



Suscetibilidade induzida a escorregamentos, via aplicação do método AHP

Induced landslides susceptibility, application of the AHP method

Carlos de Oliveira Bispo¹; Fabrizio de Luiz Rosito Listo²;
Danielle Gomes da Silva Listo³; Nivaneide Alves de Melo Falcão⁴

⁽¹⁾Doutorando do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). bispocarlos93@gmail.com;

⁽²⁾Professor do Programa de Pós-graduação em Geografia da UFPE. fabriziolisto@gmail.com.;

⁽³⁾Professora do Programa de Pós-graduação em Geografia da UFPE. dannyavlis@yahoo.com.br.

⁽⁴⁾Professora do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). nivaneide.ufal@yahoo.com.br.

Todo o conteúdo exposto neste artigo é de inteira responsabilidade dos seus autores.

Recebido em: 02 de novembro de 2019; Aceito em: 05 de janeiro de 2020; publicado em 10 de 01 de 2020. Copyright© Autor, 2020.

RESUMO: Os escorregamentos são processos da dinâmica natural da terra, amplificados diante da ocupação inadequada de áreas suscetíveis a movimentos de massa, podendo acarretar em desastres com prejuízos materiais e humanos. Em consonância com esta realidade o presente artigo tem como objetivo, avaliar a suscetibilidade induzida a escorregamentos no litoral norte de Maceió – AL, por meio da aplicação do método Analytic Hierarchy Process – AHP, em ambiente SIG. Foram utilizados fatores relativos à geologia, geomorfologia, solos, declividade e forma do terreno e uso da terra. A análise espacial foi realizada por meio de métodos multicritérios e álgebra de mapas com a ponderação das variáveis via AHP. Para validar os resultados, utilizou-se um mapa inventário contendo 29 cicatrizes de escorregamentos, identificadas em 2017. Os resultados apontam que a área estudada possui médio potencial para ocorrência de processos de escorregamentos, em que as classes de suscetibilidade baixa, média, alta, apresentaram respectivamente uma frequência de 10%, 75% e 15%. Na validação nota-se que 74% dos escorregamentos estão concentrados na classe de suscetibilidade alta, 25% na classe de suscetibilidade média e apenas 1% na classe de suscetibilidade baixa. Destarte, o mapa obtido pode ser considerado útil para monitorar as áreas suscetíveis a escorregamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfologia. Escorregamentos. Geoprocessamento.

ABSTRACT: The landslides are processes of the natural dynamics of the earth, amplified in face of the inadequate occupation of areas susceptible to mass movements, which can lead to disasters with material and human damages. In line with this reality, the present article aims to evaluate the susceptibility induced to landslides in the north coast of Maceió - AL, by applying the Analytic Hierarchy Process - AHP method, in GIS environment. Factors related to geology, geomorphology, soils, slope and shape of the terrain and land use were used. Spatial analysis was performed using multicriteria methods and map algebra with the weighting of variables via AHP. To validate the results, we used an inventory map containing 29 landslide scars, identified in 2017. The results indicate that the studied area has medium potential for occurrence of landslide processes, in which the susceptibility classes are low, medium, high, presented a frequency of 10%, 75% and 15% respectively. Validation shows that 74% of landslides are concentrated in the high susceptibility class, 25% in the medium susceptibility class and only 1% in the low susceptibility class. Thus, the map obtained can be considered useful for monitoring areas susceptible to landslides.

KEYWORDS: Geomorphology. Landslides. Geoprocessing.

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização na maior parte dos grandes centros do Brasil tem ocorrido de forma espontânea sem haver um planejamento territorial adequado. Maceió, assim como a maioria das grandes cidades brasileiras, não teve um planejamento territorial onde prezasse por uma melhor distribuição da população; observou-se nas últimas décadas uma rápida expansão irregular na sua área urbana, que está assentada sob terrenos da Formação Barreiras, apresentando composição geológica de sedimentos pouco consolidados, ou seja, possui por si só uma suscetibilidade natural a processos morfodinâmicos da paisagem, como escorregamentos.

No caso específico do litoral norte de Maceió, há de se notar que a região vem se expandindo em ritmo acelerado, visto que a parte central e o sul da planície costeira do município de Maceió já se encontram densamente urbanizadas, deve-se levar em conta que o município de Maceió está situado na faixa costeira do nordeste oriental, com área de 503,072 km² e população estimada de 1.012.382 habitantes (IBGE, 2018). Seu perímetro urbano está dividido oficialmente em 50 Bairros (Lei mun. 4952/2000) constituindo-se por oito Regiões Administrativas – RA. A área estudada faz parte da RA 8 (Figura 1).

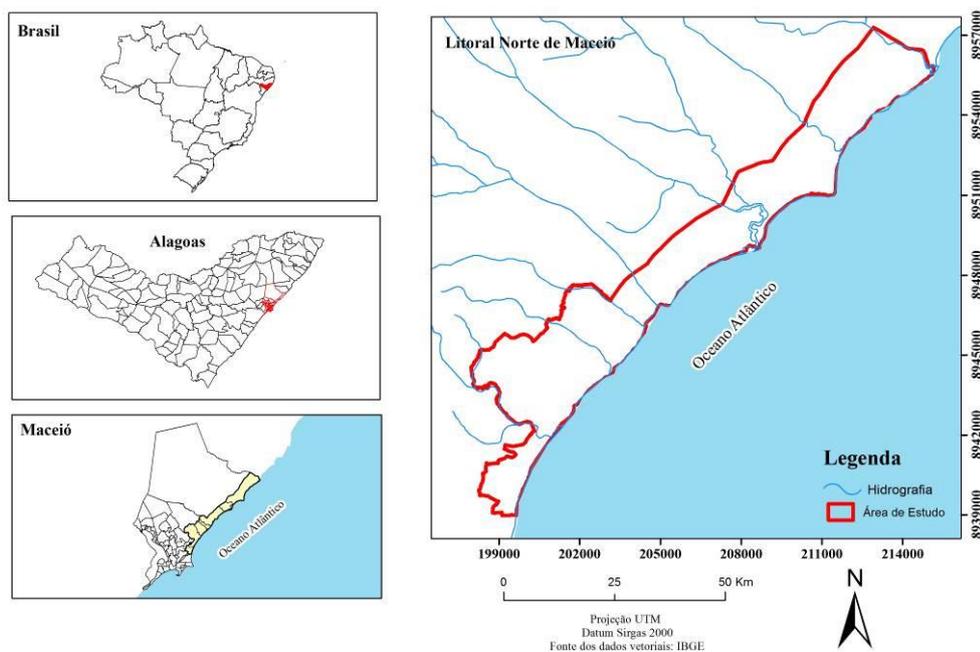


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Para cidades com características como a de Maceió, os mapeamentos de suscetibilidade aplicados ao planejamento territorial têm sido recomendados pelo Ministério das Cidades em consonância com a Lei n. 12.608/2012, cujas diretrizes têm como principal foco contribuir para a redução de desastres, principalmente pela prevenção, através do incentivo no Planejamento Urbano.

Os escorregamentos, são caracterizados como movimentos rápidos, de curta duração, com velocidades de metros por hora a metros por segundo. Apresentam planos de ruptura bem definidos entre o material deslizado e o não movimentado (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; SELBY, 1993; GUERRA *et al.*, 2017), e podem assumir geometria rotacional, translacional ou em formato de cunha.

A suscetibilidade indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência, ou ainda, propensão ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo em uma dada área (BRASIL, 2007; PFALTZGRAFF 2007; FEEL *et al.*, 2008; BRITO, 2014).

A carta de suscetibilidade elaborada neste estudo considera que a suscetibilidade a escorregamentos pode ser inicialmente analisada por meio de fatores condicionantes intrínsecos à natureza dos terrenos (suscetibilidade natural) levando-se em conta as propriedades geológicas, pedológicas, topográficas, fatores climáticos etc., e, diante das modificações antrópicas pelas diversas formas de uso e ocupação da terra, com a alteração dos agentes predisponente da suscetibilidade natural, tem-se a suscetibilidade induzida, onde se leva em conta todos os fatores condicionantes da suscetibilidade natural acrescido do uso e ocupação da terra (PFALTZGRAFF, 2007; FEEL *et al.*, 2008; TORRES 2014; BRITO 2014; MENEZES JÚNIOR, 2015).

O mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos se constitui como um adequado instrumento técnico-científico para auxiliar no planejamento urbano, servindo de aporte para os gestores públicos se anteciparem quanto a possíveis problemas nas áreas em processo de ocupação (FELL *et al.*, 2008).

Para o mapeamento realizado neste estudo, optou-se pelo uso do método AHP, por se caracterizar como um dos métodos de análise multicritério mais utilizados em estudos que trabalham com muitos fatores condicionantes. O método AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, possui base matemática, no qual é possível organizar e avaliar a importância relativa entre os critérios e checar a consistência dos julgamentos realizados (SAATY, 1991).

O método AHP tem sido bastante utilizado no Brasil e em outras partes do mundo. Das aplicações nacionais, destaca-se as pesquisas de Torres (2014), Menezes (2015) e Brito (2014), os dois primeiros aplicaram o AHP na região Nordeste, e o último aplicou o método na região Sul. Internacionalmente cita-se as pesquisas de Tran *et al.* (2002); Reis *et al.* (2012). Tran *et al.* (2002) utilizou o AHP para avaliar a vulnerabilidade ambiental na região do meio do Atlântico nos Estados Unidos; Reis *et al.* (2012) executou o AHP em um estudo sobre a suscetibilidade a deslizamentos na região nordeste da Turquia. Os autores citados encontraram resultados satisfatórios que validaram as respectivas cartas de suscetibilidade.

Destarte, os autores objetivam com este artigo avaliar a suscetibilidade induzida a escorregamentos no litoral norte de Maceió, nordeste do Brasil, por meio da aplicação do Método AHP em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica).

JUSTIFICATIVA

A escolha da área de estudo é devido a mesma representar uma área que vem perdendo suas características naturais diante da ocupação urbana recente, em detrimento disso, vários desequilíbrios ambientais já foram notados, com tendência a se agravar, causando transtornos econômicos e sociais. Além disto, o município de Maceió não possui uma ampla bibliografia voltada para o tema suscetibilidade a escorregamentos, tampouco um banco de dados georreferenciados de eventos nos últimos anos.

Dada a importância da carta de suscetibilidade frente a expansão urbana da região estudada, a presente pesquisa visa oferecer à prefeitura de Maceió e consequentemente a sociedade, uma identificação prévia das áreas mais críticas para ocupação urbana ao longo do litoral norte da cidade que atualmente se encontra em processo acelerado de expansão.

METODOLOGIA

SELEÇÃO DOS PARÂMETROS

A modelagem para a avaliação da suscetibilidade do litoral norte de Maceió por meio da AHP consistiu na seleção dos fatores que condicionam a suscetibilidade na área

de estudo; todos trabalhados em ambiente SIG e elaboradas em uma escala predominantemente de 1:50.000, utilizando-se o Sistema de Coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 25 S, correspondente ao meridiano central -33° e Datum de referência SIRGAS 2000.

Os parâmetros utilizados para elaboração do mapa de suscetibilidade induzida foram: Declividade, Formas do Terreno, Geomorfologia, Geologia, Solos e Uso e Ocupação da Terra. Os três primeiros foram produzidos por meio de um Modelo Digital do Terreno - MDT (*alos palsar*), com resolução de 12,5 m, escala de 1:50.000, obtido gratuitamente, dentro de uma rotina automatizada no *software ArcGIS*, com o uso da caixa de ferramentas *ArcToolbox /3D Analyst Tools/Raster Surface*.

Para a classificação do mapa de declividade adotou-se três classes (0° - $9,6^{\circ}$ / $9,7^{\circ}$ - $16,7^{\circ}$ / $16,8^{\circ}$ >) conforme a Lei *Lehmann*, Lei n.6.766/79, da qual afirma-se que a ocupação é permitida nas duas primeiras classes; na terceira, não é permitida a ocupação, salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes. No mapa das Formas do Terreno seguiu-se a proposta metodológica de Valeriano e Carvalho Júnior (2003), considerando-se os seguintes conjuntos de formas: retilínea/planar; convexo/planar; côncavo/planar; côncavo/divergente; convexo/divergente; retilínea/divergente; retilínea/convergente; convexo/divergente e convexo/convergente.

Especificamente para o mapa de Unidades Geomorfológicas foram utilizados os critérios do Manual Técnico de Geomorfologia do IBGE (2009), o mapeamento foi confeccionado a partir de dados topográficos adquiridos via MDT (*alos palsar*) para extração da declividade, altimetria e curvas de nível, juntamente com elementos como litologia, solo, imagens de satélite (*RapidEye*, *Google Earth Pro*) e levantamentos de campo, essenciais para compreender a complexidade de formas existentes na área estudada. Os procedimentos foram realizados dentro de um ambiente SIG no *ArcGIS*. Desta forma conseguiu-se obter como resultado os compartimentos geomorfológicos existentes na área estudada (IBGE, 2009).

O mapa de Solos (1:100.000) foi compilado da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Por fim, o mapa das unidades geológicas (1:100.000) provém do mapeamento feito em Alagoas pela CPRM.

Para o mapa de Uso e Ocupação da Terra utilizou-se uma imagem do satélite *RapidEye*, referente ao ano de 2015 (imagem mais atual, disponível). A imagem foi interpretada no *software ArcGIS*, visando a análise do uso e ocupação da terra, a

classificação foi feita de forma manual, pela delimitação de polígonos (via caixa *ArcCatalog*).

GRAUS DE SUSCETIBILIDADE

Foi necessário definir os graus de suscetibilidade de cada classe dos mapas que compõe os critérios selecionados na modelagem da suscetibilidade. Inicialmente definiu-se três níveis de suscetibilidade (baixo, médio e alto), assim como nos trabalhos de Pfaltzgraff (2007), Torres (2014) e Menezes Júnior (2015). Para isso, fez-se necessário, primeiramente, classificar os atributos dos mapas no *ArcGIS*, reclassificando-os em uma coluna de “peso” que resultará nos níveis de suscetibilidade para cada atributo, distribuídos em 1 = baixo, 2 = médio e 3 = alto, ferramenta *Spatial Analyst Tools/Reclass* no *ArcGIS*.

Para esta parte, relativa à definição dos graus de suscetibilidade dos atributos dos critérios utilizados, tomou-se como referência para a definição dos pesos, a classificação realizada por trabalhos produzidos acerca do mesmo fenômeno e características geoambientais semelhantes, como visto em Torres (2014) e Menezes Júnior (2015). Diante disso, foram realizadas as devidas adaptações considerando o ambiente estudado; além de trabalhos de campo para validação.

ESTRUTURAÇÃO DO AHP

Depois de atribuídos os graus de suscetibilidade para cada classe dos cinco critérios adotados, os mapas foram convertidos em raster no *software ArcGIS*, procedimento necessário para realizar a álgebra de mapas, culminando no mapa de suscetibilidade. O procedimento é realizado por meio da ferramenta *Map Algebra* contida na caixa de ferramentas *Arctoolbox*, do *software ArcGIS*, via calculadora *raster*, no qual acontece a inserção dos pesos de cada um dos critérios. Para se chegar ao peso específico dos critérios: Geologia, Geomorfologia, Solos, Formas do Terreno, Declividade e Uso da terra foram adotados diante do método AHP, as seguintes fases:

I - Estruturação Hierárquica: definição do objetivo global e decomposição do sistema em vários níveis de hierarquia (Figura 2).

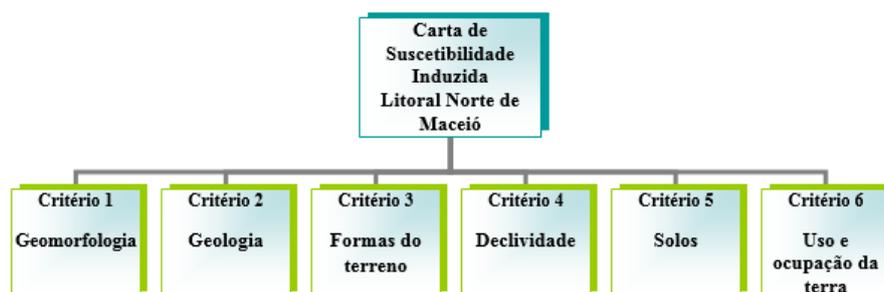


Figura 2: Hierarquização para aquisição do mapa de suscetibilidade induzida via AHP

Fonte: elaborado pelos autores (2018)

II – Comparação par a par dos elementos em cada nível do sistema: se constitui em um julgamento comparativo por meio da atribuição de pesos, onde se procura determinar a importância relativa de cada elemento de um nível hierárquico com relação a cada critério no nível imediatamente superior. Estes pesos são determinados pela escala de julgamentos (Escala Fundamental de *Saaty*) a qual varia de 1 quando os critérios possuem mesma importância a 9 para importância absoluta de um critério sobre outro, conforme **Tabela 1**.

Tabela 1: Escala Fundamental da AHP

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual Importância	Duas atividades contribuem igualmente com o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
5	Essencial ou forte importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e seu domínio é demonstrado na prática
9	Extremamente importante	A evidência favorece uma atividade sobre a outra
2, 4, 6, 8	Valores intermediário entre dois julgamentos adjacentes	Quando o compromisso é necessário

Fonte: Adaptado de Saaty (1991)

Por meio de critérios pré-selecionados, utiliza-se uma matriz quadrada, na qual se realiza uma análise aos pares, culminando em um peso para cada critério. Tomando por base os pesos da Escala Fundamental, forma-se a matriz de comparação paritária, conforme **Quadro 1**.

Quadro 1: Matriz quadrada de correlação par a par

Critérios	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	1	C ₂₁ =1/C ₁₂	C ₃₁ =1/C ₁₃	C ₄₁ =1/C ₁₄	C ₅₁ =1/C ₁₅
C ₂	C ₁₂	1	C ₃₂ =1/C ₂₃	C ₄₂ =1/C ₂₄	C ₅₂ =1/C ₂₅
C ₃	C ₁₃	C ₂₃	1	C ₄₃ =1/C ₃₄	C ₅₃ =1/C ₃₅
C ₄	C ₁₄	C ₂₄	C ₃₄	1	C ₅₄ =1/C ₄₅
C ₅	C ₁₅	C ₂₅	C ₃₅	C ₄₅	1

Fonte: Adaptado de Saaty (2008)

III – Priorização dos elementos do sistema: após a comparação pareada por meio da matriz quadrada, parte-se para a normalização dos valores, o valor de importância de cada par é dividido pelo somatório dos valores de cada coluna. Desta forma, para a aquisição do valor do peso (**w_i**) de cada critério, realiza-se a divisão do somatório de cada linha (**ΣL**) pelo número de critérios analisados, conforme exemplo no **Quadro 2**.

Quadro 2 - Matriz de Normalização dos critérios

Critérios	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	W _i (peso)
C ₁	1/ΣC ₁	C ₂₁ /ΣC ₂	C ₃₁ /ΣC ₃	C ₄₁ /ΣC ₄	C ₅₁ /ΣC ₅	ΣL ₁ /5
C ₂	C ₁₂ /ΣC ₁	1/ΣC ₂	C ₃₂ /ΣC ₃	C ₄₂ /ΣC ₄	C ₅₂ /ΣC ₅	ΣL ₂ /5
C ₃	C ₁₃ /ΣC ₁	C ₂₃ /ΣC ₂	1/ΣC ₃	C ₄₃ /ΣC ₄	C ₅₃ /ΣC ₅	ΣL ₃ /5
C ₄	C ₁₄ /ΣC ₁	C ₂₄ /ΣC ₂	C ₃₄ /ΣC ₃	1/ΣC ₄	C ₅₄ /ΣC ₅	ΣL ₄ /5
C ₅	C ₁₅ /ΣC ₁	C ₂₅ /ΣC ₂	C ₃₅ /ΣC ₃	C ₄₅ /ΣC ₄	1/ΣC ₅	ΣL ₅ /5

Fonte: Saaty (2008)

IV – Verificação de consistência hierárquica: a matriz, segundo os preceitos de Saaty (1991), deve apresentar um grau de inconsistência ou margem de erro máxima de 0,10, caso ultrapasse esse limite haverá a necessidade de aprimoramentos com a operação real dos julgamentos. A soma dos pesos calculados deve ser igual a 1,0 (um).

Depois da comparação par a par busca-se o valor de consistência, para confirmar a validade do resultado obtido, o cálculo da Razão de Consistência (RC), permite avaliar a inconsistência em função da ordem da matriz de julgamentos, através da Equação 1.

$$RC = IC / IR \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: **RC** = Razão de Consistência; **IC** = Índice de Consistência) e **IR** = (Índice Randômico)

O Cálculo do Índice de Consistência (IC), avalia o grau de inconsistência da matriz de julgamentos paritários, conforme a Equação 2:

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \text{ onde } \lambda_{\max} = 1/n \sum_{i=1}^n [Aw] / w_i \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: **n** = número de ordem da matriz; **λ_{max}** = autovetor; **W_i** = pesos calculados e **Aw** = Produto entre W_i com a matriz de correlação pareada

A tolerabilidade da inconsistência desta matriz é determinada do “Índice Randômico” que é fornecido por uma tabela de valores (**Tabela 2**) e é função da dimensão da matriz de comparação. O IR é obtido para uma matriz randômica recíproca, com elementos não-negativos; vários tamanhos de matriz N foram aproximados por Saaty, tomando-se por base um grande número de simulações em laboratório.

Tabela 2 - Valores de IR em função da ordem da matriz quadrada

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0	0,53	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59

Fonte: Saaty (2008)

De posse IC e do IR, adquire-se o valor de RC. A RC mede a coerência e a consistência das relações de importância consideradas na análise, caso ela seja superior a 0,10, o julgamento dos condicionantes deve ser refeito, por apresentar incoerências. Quanto mais próxima de "0" for a razão de consistência, mais coerente será o modelo. Para valores de RC > 0,10 pede-se uma revisão na matriz de comparações (Saaty 1991).

VALIDAÇÃO DO MAPA DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTO

Para a validação do cenário de suscetibilidade realizou-se um mapeamento das ocorrências de cicatrizes de escorregamentos em 2017. O mapa de escorregamentos teve como objetivo analisar a distribuição dos eventos, assim como sua tipologia, tamanho, forma e estado de atividade. Na delimitação das cicatrizes de escorregamento considerou-se somente a porção de ruptura da cicatriz, desconsiderando suas áreas de arraste e de depósito, conforme proposto por Martins; Oka-Fiori; Vieira (2015), observando-se as diferenças de textura de solo e aspectos alongados.

A delimitação das cicatrizes de escorregamentos foi realizada com apoio do *software ArcGIS*, a partir da interpretação de imagens de satélite do *Google Earth Pro*. As cicatrizes de escorregamentos foram vetorizadas como polígonos com a extensão *.kml* dentro do próprio *Google Earth Pro*; após esta etapa, os polígonos foram convertidos em *shapefiles (.shp)* por meio da ferramenta *KML to Layer* (módulo *conversion tools* do *ArcGIS*) para que as cicatrizes de escorregamentos fossem trabalhadas no ambiente SIG. Posteriormente, foi realizado trabalho de campo na área de estudo, para validar as cicatrizes mapeadas.

As cicatrizes de escorregamentos (polígonos) foram sobrepostas à carta de suscetibilidade para correlacionar o grau de suscetibilidade que coincidiu com cada cicatriz de escorregamento mapeada (Concentração de Cicatrizes de Escorregamentos – CCE), ou seja, a quantidade de *pixels* inserida dentro das cicatrizes de escorregamentos. Para isto, utilizou-se a Equação 3.

$$CCE = \text{Área Atingida em cada classe} / \text{Área Atingida Total} * 100 \quad \text{Eq. 3}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Levando em consideração os critérios utilizados nesta pesquisa foi elaborado um cenário de suscetibilidade induzida a escorregamento com o uso do AHP, que resultou nos dados da Figura 3.

Crítérios	Uso	Geológico	Solos	Declividade	Forma do terreno	Geomorfológico	Wi (peso)
Uso	0,11	0,05	0,10	0,09	0,17	0,17	0,11
Geológico	0,22	0,11	0,05	0,09	0,09	0,17	0,12
Solos	0,11	0,21	0,10	0,06	0,06	0,17	0,12
Declividade	0,33	0,32	0,38	0,26	0,34	0,17	0,30
Forma do terreno	0,11	0,21	0,29	0,26	0,17	0,17	0,20
Geomorfológico	0,11	0,11	0,10	0,26	0,17	0,17	0,15

Figura 3: Pesos obtidos pelo método AHP

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

No cenário em questão, o fator condicionante com maior importância para a predisposição do terreno à ocorrência de escorregamentos foi a declividade, com um peso de 0,30, o que significa que esse fator tem 30% de influência sobre o valor final de suscetibilidade. Esse elevado peso é coerente com outros estudos, onde a declividade é considerada como o fator mais importante para mapear a suscetibilidade a escorregamentos condizentes com pesos adotados por Crepani *et al.* (2001); Cardozo e Herrmann (2011); Reis *et al.* (2012); Brito (2014); Torres (2014); Menezes Júnior, (2015).

O segundo critério condicionante de escorregamentos com maior importância foi a forma do terreno, com um peso de 0,20, ou seja, 20% de influência sobre o valor final de suscetibilidade. O peso adotado está de acordo com outros estudos, em que a forma do terreno assume importância considerável enquanto condicionantes e suscetibilidade a escorregamentos, relação vista em Valeriano e Carvalho Júnior, (2003) e Torres (2014).

Somando a esses, o fator geomorfológico recebeu peso 0,15, ou 15% de influência para o escorregamento. Esse valor é condizente com pesquisas realizadas por Cardozo e Herrmann (2011). Foram considerados com base em Crepani *et al.* (2001), julgando-se as influências da dissecação do relevo, a amplitude altimétrica assim como a declividade.

Quanto ao critério geológico, obteve-se peso de 0,12 ou seja, possui 12% de influência na suscetibilidade a escorregamentos. Justifica-se pelo fato dos escorregamentos serem fortemente controlados pelas unidades geológicas, conforme observado em Crepani *et al.* (2001); Reis *et al.* (2012); Brito (2014); Torres, (2014).

O fator solo, resultou no peso 0,12, esse fator tem 12% de influência sobre o valor final de suscetibilidade. Para isso, se levou em conta o grau de maturidade dos solos da área em estudo, pensando-se na relação morfogênese/pedogênese, conforme visto em: Crepani *et al.* (2001); Rodrigues, Calheiros, Melo (2007); Torres (2014).

Já o fator uso e ocupação da terra resultou no peso 0,11, esse fator tem 11% de influência sobre o valor final de suscetibilidade. O critério uso e ocupação da terra recebeu um peso relativamente alto, visto que na área estudada as ações antrópicas vêm alterando de forma significativa a suscetibilidade natural do terreno. O peso adotado para esse critério aproxima-se dos utilizados por Reis *et al.* (2012) e Brito (2014).

A razão de consistência obtida para o cenário da suscetibilidade foi de 0,09; isso indica que os julgamentos apresentaram consistência aceitável, ou seja, foi menor que 0,10 (Saaty 1991; 2008). Desta forma, os pesos se portaram coerentemente podendo ser utilizados na modelagem da suscetibilidade a escorregamentos.

Tomando como referência os pesos obtidos por meio do AHP, os resultados da carta de suscetibilidade (Figura 4) indicaram uma Frequência de Distribuição (FD) de 10% para as classes de baixa suscetibilidade; 75% média e, 15% de alta suscetibilidade.

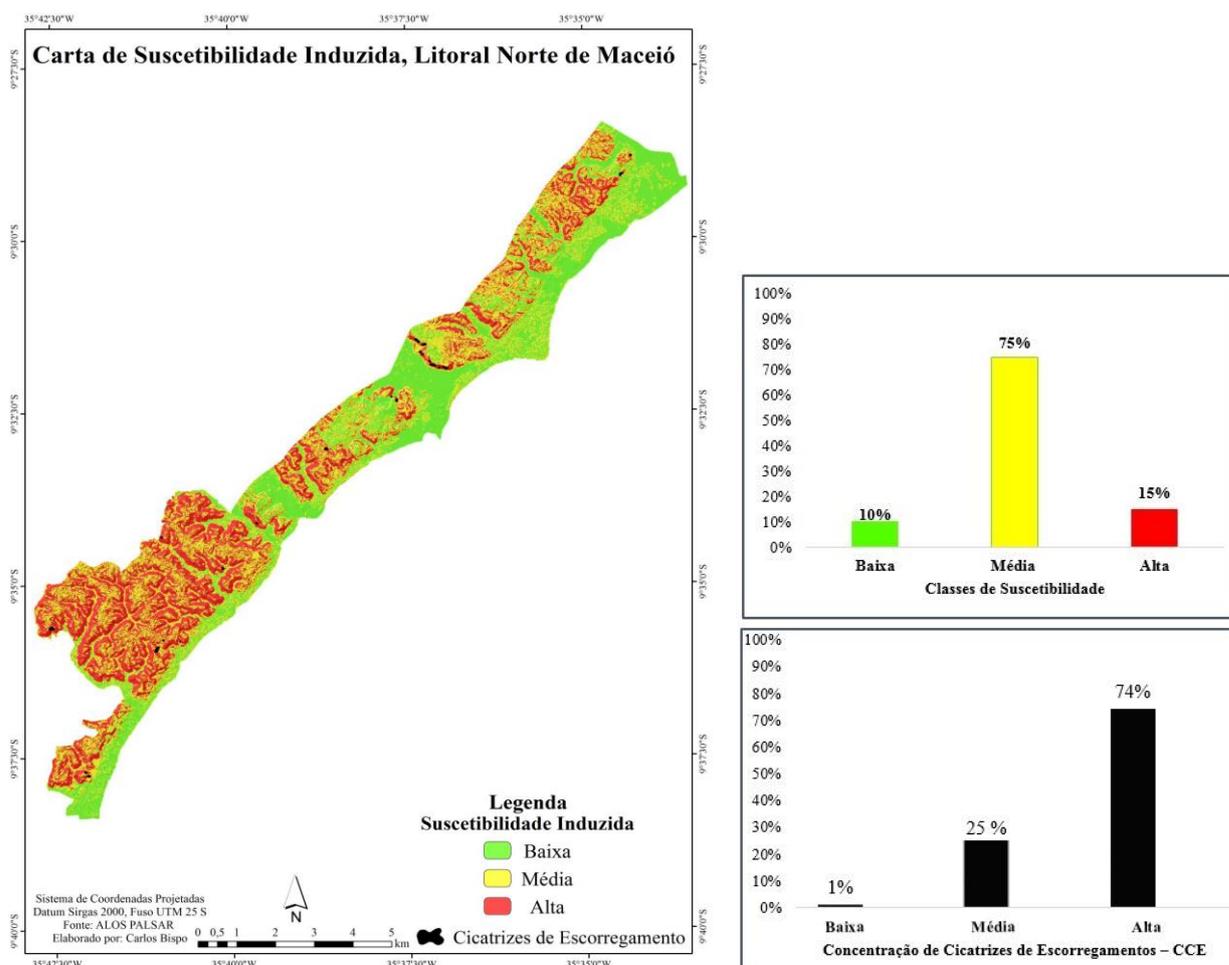


Figura 4: Mapa de Suscetibilidade da área de estudo e concentração de cicatrizes

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Por meio de correlações realizadas no ambiente SIG, assim como pelas observações nos trabalhos de campo, constatou-se que nas áreas com suscetibilidade baixa, a possibilidade de ocorrência de escorregamentos é quase nula, pois os terrenos possuem declividades suavizadas (0° - $9,6^{\circ}$) não possibilitando o fluxo rápido de massas de solo ou rocha pelo efeito da gravidade, como constatado nos trabalhos de Guidicini e Nieble (1983); Listo e Vieira (2010), entre outros. Com formas de terreno predominantemente retilínea/planar, esses padrões de forma reduzem o impacto da água com dispersão do fluxo, sendo as planícies fluvial e costeiras expressivas perante o grau de suscetibilidade baixo, relação também observada nas pesquisas de Valeriano e Carvalho Júnior (2003).

Quanto ao padrão geológico, observou-se que o grau de suscetibilidade baixa é correspondente as classes dos depósitos litorâneos, fluviais e de manguezais. Já para o solo correspondente ao grau de baixa suscetibilidade foram principalmente as classes dos Gleissolos Hápicos, dos Neossolos Quartzarênicos e Neossolos Flúvicos, estando de acordo com o estudo de Rodrigues, Calheiros, Melo (2007).

Nos locais com grau de suscetibilidade média existe uma possibilidade de ocorrência de escorregamento (Figura 5). Correspondem a formas de terreno principalmente convexas detentoras de declividade entre $9,6^{\circ}$ a $16,7^{\circ}$. Geologicamente corresponde a formação barreiras, que devido a suas características físicas contribui para elevar o grau de suscetibilidade da área. Os tabuleiros (topo planar e convexo), assim como, os solos (latossolos e argissolos) composto por essa formação, também contribuem significativamente para o grau de suscetibilidade médio.



Figura 5: Cicatriz de escorregamento em uma área de suscetibilidade média

Fonte: autores (2018)

As áreas de suscetibilidade alta apresentam regiões com elevada potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos, pois os terrenos possuem declividades bastante íngremes ($16,8^\circ >$), (Figura 5), favorecendo o fluxo rápido de massas de solo ou rocha pelo efeito da gravidade, em concordância com o observado nos trabalhos de Guidicini e Nieble (1983); Listo e Vieira (2010).



Figura 5 - Cicatriz de Escorregamento em uma área de alto risco

Fonte: Bispo *et al.* (2015)

Constatou-se que as encostas são os principais modelados responsáveis pela elevação do grau de suscetibilidade na área. Quanto ao padrão geológico observou-se que o grau de suscetibilidade alto tem influência significativa da formação barreiras. O fator solo apresenta os argissolos e latossolos como condicionantes significativos para elevar o grau de suscetibilidade para alto, esse resultado corrobora com o trabalho realizado por Rodrigues, Calheiros e Melo (2007).

A validação do mapa de suscetibilidade por meio da superposição das cicatrizes de escorregamentos no mapa de suscetibilidade anteriormente mostrado na Figura 3, evidenciou que o modelo utilizado para a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos se mostrou aplicável para o litoral norte de Maceió, pois das 29 cicatrizes localizadas, obteve-se uma CCE de 74% na classe de suscetibilidade alta; 25% nas classes de suscetibilidade média e apenas 1% na classe de suscetibilidade baixa. Isso significa que

as áreas indicadas pelos modelos como mais suscetíveis são justamente onde ocorrem a maioria dos processos de escorregamentos.

Em linhas gerais, os resultados obtidos são satisfatórios, permitindo avaliar a suscetibilidade a escorregamentos eficientemente. Contudo, concorda-se com Brito (2014) que a avaliação das áreas suscetíveis a escorregamentos não é uma ciência exata, podendo apresentar certa subjetividade, e que os resultados obtidos se constituem em uma predição, a qual depende da qualidade dos dados utilizados. Apesar da limitação quanto a subjetividade para a modelagem realizada nesta pesquisa obteve-se uma boa razão de consistência (RC 0,09) para o cenário da suscetibilidade induzida.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, considera-se que o mapa de suscetibilidade induzida permitiu afirmar que as áreas que correspondem à suscetibilidade baixa estão aptas a ocupação, sem riscos eminentes quanto a processos de escorregamentos. As áreas que correspondem à suscetibilidade média podem ser ocupadas desde que se adequem às normas técnicas e ambientais. Nas áreas com suscetibilidade alta não é recomendada a ocupação devido a associação de fatores que potencializam a ocorrência de escorregamentos, a menos que sejam realizadas obras de engenharia que possibilitem a ocupação.

A carta de suscetibilidade induzida a escorregamento teve sua validação por meio do mapeamento de cicatrizes, tendo uma grande quantidade de cicatrizes presentes nas classes de maior suscetibilidade (alta), o que atestou sua aplicabilidade, pois quanto maior a coincidência entre os escorregamentos e a área designada como sendo de alta suscetibilidade, melhor é considerado o desempenho dos mapeamentos.

As ferramentas de geoprocessamento juntamente com o método AHP, contribuíram significativamente para o diagnóstico de suscetibilidade. Destaca-se que a incorporação do método AHP nos mapeamentos de suscetibilidade a escorregamentos é uma das principais contribuições desta pesquisa no sentido de diminuir a limitação no tocante a subjetividade destes mapeamentos comumente adotados via métodos heurísticos.

REFERÊNCIAS

1. BRASIL. **Lei Federal n. 6.766, 19 de dezembro de 1979**. Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 29 de dezembro de 1979. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>> Acesso em: 10 jan. 2017.
2. _____. **Lei Nº 12.608 - de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Diário Oficial da União, Brasília, 10 de abril de 2012. <http://www.planalto.gov.br/ccivil03/>> Acesso em: 14 abr. 2017.
3. _____. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, (orgs). – Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 175 p.
4. BRITO, M. M. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS**. 2014. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2014.
5. CAMARINHA, P. I. M.; CANAVESI, V.; ALVALÁ, R. C. S. Shallow landslide prediction and analysis with risk assessment using a spatial model in a coastal region in the state of São Paulo, Brazil. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, 2449-2468, 2014.
6. CARDOZO, F. S.; HERRMANN, M. L. P. Uso da técnica AHP no mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15; 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011. p. 4134-4141.
7. CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico Econômico e ao Ordenamento Territorial**. INPE, São José dos Campos, 2001.
8. FELL, R. *et al.* Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**. v. 102, 83-111, 2008.
9. GUERRA A J T. *et al.* Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. **Pedosphere**. v. 27, 27-41, 2017.
10. GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de Escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher; 1984.
11. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de geomorfologia** – 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2009.182 p.
12. LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C. Análise de Condicionantes Topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos. Recife, **Revista de Geografia**, vol. especial, n. 3, 193-207, 2010.
13. MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C. Mapeamento de cicatrizes de escorregamentos utilizando imagem multiespectral. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 30, 96-109, 2015.
14. MENEZES JÚNIOR, E. M. **Análise geomorfológica da suscetibilidade a deslizamentos na folha Paulista (1:25.000)** 2015. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – UFPE, Recife, 2015.
15. PFALTZGRAFF, P. A. dos S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos da região metropolitana de Recife**. 2007. Tese (Doutorado). Programa de

Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

16. REIS, S.; *et al.* Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy methods in Rize province (NE Turkey). **Environmental Earth Sciences**. v. 66, n. 7, 2063-2073, 2012.
17. RODRIGUES, B. T.; CALHEIROS, S. Q. C.; DE MELO, N. A. Potencial de movimento de massa no município de Maceió-Alagoas. **Geo UERJ**. v. 1, n. 24, 207-227, 2007.
18. SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Mcgraw-hill, 1991.
19. SAATY, T. L. Relative measurement and Its generalization in decision making why Pairwise comparisons are Central in mathematics for the measurement of intangible factors the Analytic Hierarchy Process. **Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. – RACSM**. v.102, n. 2, 251–318, 2008.
20. SELBY, M. J. **Hillslope: materials & processes**, New York, 1993.
21. TORRES, F. S. M. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.
22. TRAN L. K. CG.; *et al.* Environmental assessment fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability of the mid-atlantic region. **Environ Manag**. v. 29, 845–859, 2002.
23. VALERIANO, M.M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 1, 17-29, 2003.