

AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE À MOVIMENTOS DE MASSA, UTILIZANDO AS VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS, PARA AS SERRAS DA PORÇÃO SUL DO MACIÇO CENTRAL DO CEARÁ

*Susceptibility Assessment to Mass Movements Using Morphometric Variables in
the Southern Portion of the Central Ceará Massive*

**Alcione Moreira do Carmo, Michael Vandesteen Silva Souto, Cynthia
Romariz Duarte, Pamela Sampaio Lopes & José Antônio Beltrão Sabadia**

**Universidade Federal do Ceará – UFC
Programa de Pós-Graduação em Geologia**

Campus do Pici, Departamento de Geologia, Bloco 912. Fortaleza/CE. CEP 60455-760, Brasil
{alcione.moreira, pamsl22}@gmail.com, {michael.souto, cynthia.duarte, sabadia}@ufc.br

*Recebido em 17 de Novembro, 2015/ Aceito em 22 de Abril, 2016
Received on November 17, 2015/ Accepted on April 22, 2016*

RESUMO

Nas últimas décadas desastres naturais ocasionados por deslizamentos de encosta têm causado muitas mortes no Brasil. Cartas de suscetibilidade à movimentos de massa têm sido empregadas para apontar áreas suscetíveis a esses fenômenos em regiões serranas, permitindo melhor planejamento do uso e ocupação da terra. Este trabalho apresenta cartas de suscetibilidade à movimentos de massa, baseadas na análise das variáveis morfométricas, naturais e ambientais, como forma de efetuar uma avaliação multicriterial de análise de suscetibilidade. Produtos de sensores remotos (Landsat 8 e Topodata) e mapas pré-existentis (geologia, solo, vegetação) foram empregados, onde a metodologia aplicada foi desenvolvida dentro de um ambiente SIG por meio da utilização de álgebra de mapas para geração das cartas de suscetibilidade morfológica, ambiental e natural à movimentos de massa. O cálculo envolveu ponderações, onde as influências das variáveis e os pesos das unidades foram desenvolvidos e analisados por meio dos métodos Delphi e AHP. Os resultados obtidos possibilitaram a identificação de pequenas diferenças nos valores de suscetibilidades, definidos em cinco classes (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta). Essas pequenas diferenças ocorreram entre as cartas morfológica e ambiental, onde refletiram o peso da ação antrópica nos valores das influências dadas. A CASMO (Carta de Suscetibilidade Morfológica) apresentou mais diferenças entre as demais cartas, mas isso foi em função da diferença de resoluções entre os produtos analisados. Conclui-se que os métodos empregados foram eficientes para esta avaliação e que as cartas CASAM (Carta de Suscetibilidade Ambiental) e CASNA (Carta de Suscetibilidade Natural) geraram as melhores análises na escala de 1:25.000.

Palavras chave: Geomorfologia, Suscetibilidade, Movimentos de Massa, TOPODATA, Variáveis Morfométricas.

ABSTRACT

In recent decades, natural disasters caused by landslides have caused many deaths and economic losses in Brazil and as worldwide. Susceptibility maps to mass movements have been used to indicate areas susceptible to these phenomena in mountainous regions, allowing better planning of the land use. This paper presents susceptibility maps to mass movements, based on morphometric variables natural and environmental analysis, in order to make an evaluation multicriterial about susceptibility to this kind of movement. Remote sensing products (Landsat 8 and TOPODATA) and some pre-existing maps, (like geology, pedologic and vegetation maps) were used, using map algebra in GIS

environment, to generate morphological susceptibility maps, environmental and natural to mass movements. The calculation involved values, where the influences of the variables and the values of the units were analyzed by Delphi and AHP methods. The results allowed the identification of small differences in susceptibilities values for five defined classes (Very Low, Low, Medium, High, and Very High). These small differences occurred between the morphological and environmental maps, which reflected the weight of human actions on the assigned influence values. The CASMO (Morphological Susceptibility Map) presents the greater variations in relation to the other maps, due to the difference between the resolutions of the analyzed products. We conclude that the methods employed were efficient for this kind of assessment and that the CASAM map (Environmental Susceptibility Map) and CASNA map (Natural Susceptibility Map) obtaining better results when analyzed in 1:25,000 scale.

Keywords: Geomorphology, Susceptibility, Mass Movements, TOPODATA, Morphometric Variables.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento de desastres ambientais nas últimas décadas, em função de fenômenos naturais, o governo federal estabeleceu a Lei Nº 12.608 (10 de abril de 2012), onde definiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Muitas dessas tragédias ocorreram em regiões serranas, devido a grandes enxurradas pluviais por vez seguido pelos movimentos de massa. Em todas as situações a ocorrência de evento climático severo associado as condições geomorfológicas e de ocupação antropogênica conduziram a um grau elevado de perda de vidas humanas. Logo, a Lei Nº 12.608/2012 estabeleceu diretrizes para mapeamento de áreas de risco por meio de estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades, vulnerabilidades e risco de desastre para instalação de planos de contingência como forma de mitigar os efeitos devastadores desses desastres.

As variáveis morfométricas são instrumentos importantes para análise geomorfológica de uma região, pois permite estudar os processos de evolução e das formas de relevo (OZDEMIR, 2011). Esse tipo de análise também possibilita deferir a suscetibilidade de um terreno por meio das observações do comportamento que ele possa apresentar devido a sua forma geométrica, permitindo um prognóstico preventivo as suscetibilidades que o terreno possa oferecer. Além disso, outros fatores que controlam essas formas devem ser avaliados para o cálculo da suscetibilidade, como a Geologia, onde as diferenças entre os tipos de rochas podem ocasionar a rápida movimentação de massa pelas suas características texturais e estruturais de formação (falhas, fratura, foliações, dobras, etc.).

A erosão, que é um dos processos geomorfológicos mais importantes para o

modelamento do relevo, se combinado com outros fatores, pode desencadear desastres naturais, tais como os movimentos de massa, principalmente em vertentes com declives acentuados. Estes movimentos de massa se ocorridos nas encostas em regiões populosas podem ser catastróficos, causando perda de vidas e prejuízos materiais para população (GUIMARÃES *et al.*, 2008). Vários dos fatores condicionantes desses processos geomorfológicos, seja os processos erosivos lentos ou os movimentos de massa, estão relacionados as variáveis morfométricas, como a orientação de vertentes, o grau de inclinação das encostas e a forma do terreno, que é definida a partir da associação dos tipos de curvaturas vertical e horizontal (Figura 1). Então, a morfologia do relevo é um fator importante para definir a suscetibilidade que um local possa ter tanto na ação erosiva quanto à movimentos de massa em um terreno. Porém, como forma de análise comparativa, outros fatores não foram descartados nesta avaliação, como solo, cobertura vegetal e geologia, pois fazem parte do sistema geomorfológico.

Com o objetivo de aplicar técnicas de mapeamento e de análise morfométrica para avaliação da suscetibilidade à movimentos de massa, foi escolhido uma área serrana como área piloto, localizada na porção ao Sul do Maciço Central do Estado do Ceará (Figura 2), que possui uma diversificação geomorfológica propícia para esta avaliação. Para isso, foram utilizados produtos de Sensoriamento Remoto para confecção dos mapas de Hipsometria e das Variáveis Morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal) por meio dos sensores ativos, e os mapas de Cobertura e Uso da Terra e Densidade de Lineamentos por meio dos sensores passivos. Os mapas citados foram confeccionados na escala de 1:100.000

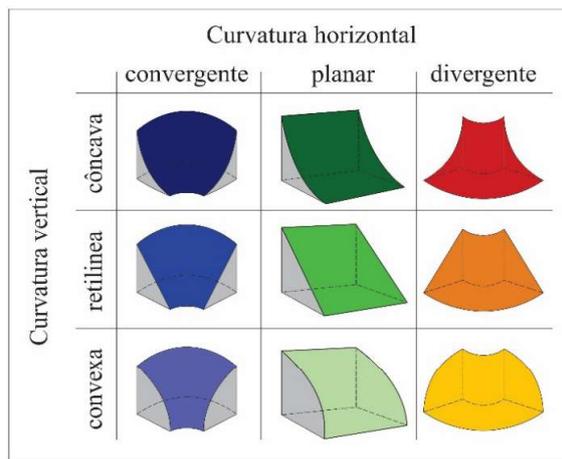


Fig. 1 – Esquema de combinação das curvaturas vertical horizontal para representar a morfologia do terreno. Fonte: Valeriano e Albuquerque (2010).

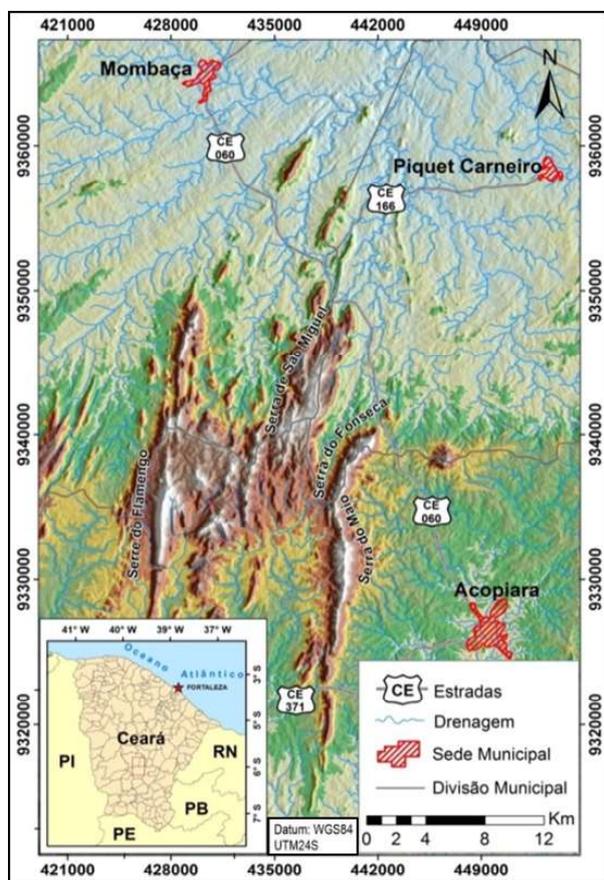


Fig. 2 – Mapa de localização da área de estudo adaptado a partir do MDT Topodata.

Dados pré-existentes na escala 1:500.000 (geologia, vegetação e solo) também foram utilizados para geração das cartas de avaliação de suscetibilidade à movimentos de massa, sendo as cartas avaliadas em três tipos: Carta de Avaliação de Suscetibilidade Morfológica (CASMO), Carta de Avaliação de Suscetibilidade

Ambiental (CASAM) e Carta de Avaliação de Suscetibilidade Natural (CASNA).

Todos os mapas e as cartas gerados neste trabalho foram construídos num Sistema de Informações Geográficas (SIG), que possibilitaram a aplicação de métodos de análise através de álgebra de mapas, integrando e interrelacionando as informações confeccionadas para avaliação da suscetibilidade à movimentos de massa. Para isso, foram avaliados alguns métodos estatísticos como forma de verificação e validação das ponderações utilizadas para geração dessas cartas. As técnicas e materiais empregados são de domínio público/científico, sendo escolhidas as melhores que se adequavam para esta análise.

1.1 A Morfologia das Encostas e os Processos de Modelagem e Evolução de Vertentes

A ocorrência de processos de modelagem e evolução de vertentes é assunto recorrente na ciência geomorfológica, já tendo sido abordado por diversos autores, que trabalharam com análise de encostas e sua relação com riscos geológico e geotécnico. Os processos erosivos também incluídos como um desses agentes de evolução das vertentes, podem ser promovidos por vários fatores, como o vento, a gravidade, o gelo e a água (SUGUIO, 1998). No caso das encostas de montanhas e serras, os agentes principais são a água e a gravidade. Para Guerra e Marçal (2006) a Geomorfologia tem um papel fundamental para o estudo da erosão dos solos, nesse sentido os autores ainda concordam com a prerrogativa de que é pouco provável que seja possível diagnosticar com segurança as áreas suscetíveis a processos erosivos e aos movimentos de massas, sem o conhecimento mais aprofundado da morfologia do terreno e de seus processos associados.

O intemperismo é um fator preponderante para o modelamento das vertentes, pois ele age degradando o substrato rochoso mais superficial, mesmo que de forma lenta, produzindo os materiais que serão transportados e depositados ao longo das vertentes. Para Porto (1998) a quantidade de material resultante do intemperismo depende da composição mineral das rochas, do clima e da morfologia do terreno. Logo, os processos erosivos mais

comuns nas vertentes de encostas são aqueles associados ao escoamento superficial, como os produzidos pelas erosões (quando lento) ou pelos movimentos de massa (quando rápido), seja pela ação pluvial ou fluvial. Eles são responsáveis pela evolução das vertentes, onde proporciona uma estreita interrelação entre a morfologia da vertente e o tipo de escoamento superficial.

Para Gerscovich (2012) os movimentos de massa são processos de evolução das vertentes associados com a instabilidade dessas encostas. Segundo Filho e Virgili (1998), vários fatores podem condicionar esses processos, são eles: características geomorfológicas (características do perfil das encostas), características geológicas (litológicas e estrutural), uso e ocupação do solo, vegetação, características climáticas, solos, entre outras. Ainda para Gerscovich (2012), as erosões não estão incluídas na classificação de movimentos de massa, sendo os processos erosivos constituídos por vários fatores.

De acordo com Christofolletti (1980), Bigarella (2003) e Ritter *et al.* (2006), o tipo de encosta possui grande influência nos processos erosivos e no desencadeamento dos movimentos de massa e a análise da relação entre concavidade, convexidade, segmento retilíneo e declividade da vertente define pontos e graus diferentes de suscetibilidade à movimentos de massa, bem como os locais prováveis para deposição dos sedimentos decorrentes desses processos.

Para Derruau (1965 apud CHRISTOFOLETTI, 1980) a forma clássica de vertente “normal ou regular” é composta por um topo convexo e uma base côncava, separadas por um segmento retilíneo com declividade por volta de 25% (Figura 3).

Ainda de acordo com Christofolletti (1980) e Casseti (2005), cientistas como Dalrymple *et al.* (1968) propuseram um modelo hipotético de análise do perfil de vertentes (Figura 4), indicando quais processos geomorfológicos pode ocorrer em cada setor da encosta (detalhado na Tabela 1).

Seguindo essa ideia pode-se fazer um zoneamento de suscetibilidade à movimentos de massa para cada setor da encosta utilizando a associação das variáveis morfométricas.

Segundo Cunha e Guerra (1998), o equilíbrio da encosta depende da quantidade de material intemperizado disponível, da quantidade de chuvas, da vegetação, da geologia e principalmente da morfologia do terreno e do grau de declividade das encostas. Qualquer alteração em um desses fatores pode deflagrar os movimentos de massa. Portanto, é válido dar mais credibilidade ao estudo da morfologia do terreno, identificando possíveis pontos de suscetibilidades para posteriormente fazer cruzamentos com outras variáveis, como solo, vegetação e tipos de ocupação do terreno, para poder realizar um diagnóstico mais preciso quanto a possibilidade de desencadeamento de uma possível movimentação de massa.

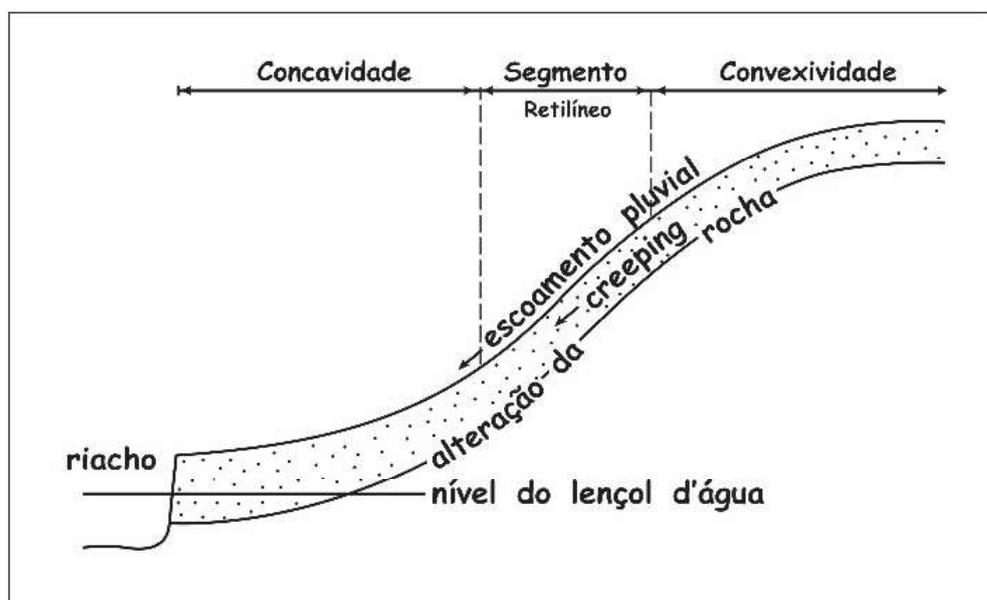


Fig. 3 – Composição da vertente “normal ou regular” de Derruau. A área pontilhada indica o manto de regolito. Fonte: Christofolletti (1980). Adaptado de Derruau (1965).

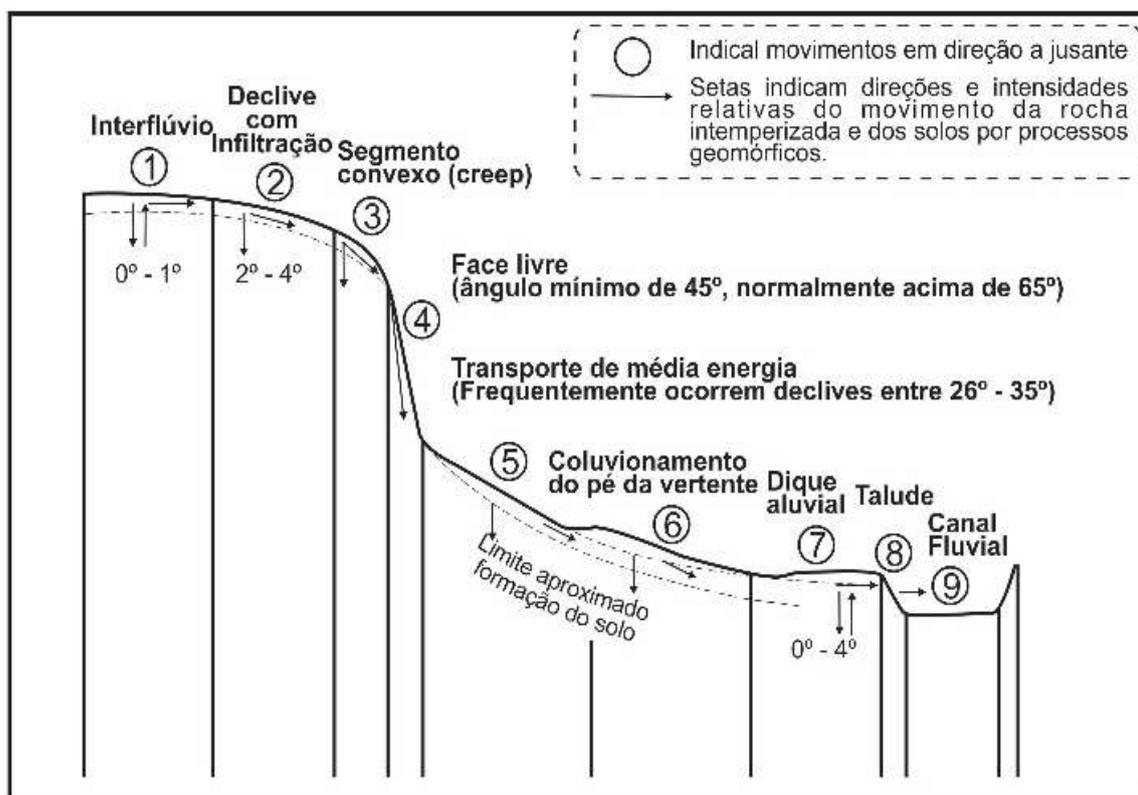


Fig. 4 – As nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple *et al.* (1968). Fonte: Cassetti (2005).

Tabela 1: Descrição das nove unidades hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple *et al.* (1968) da Figura 4

Unidades da Vertente	Processo Geomorfológico Dominantes
1 Interflúvio (0°-1°)	Processos pedogenéticos associados com movimento vertical da água superficial.
2 Declive com infiltração (2°-4°)	Eluviação mecânica e química pelo movimento lateral da água subsuperficial.
3 Declive Convexo com reptação	Reptação e formação de terracetes.
4 Escarpa (ângulo mínimo de 45°)	Desmoronamentos, deslizamentos, intemperismo químico e mecânico.
5 Declive intermediário de transporte	Transporte de material pelos movimentos coletivos do solo; formação de terracetes; ação da água superficial e subsuperficial.
6 Sopé coluvial (ângulo entre 26° e 35°)	Reposição de material pelos movimentos coletivos e escoamento superficial; formação de cones de dejeção; transporte de material; reptação; ação subsuperficial da água.
7 Declive aluvial (0°-4°)	Deposição aluvial; processos oriundos do movimento subsuperficial da água.
8 Margem de curso de água	Corrosão, deslizamento, desmoronamento.
9 Leito do curso de água	Transporte de material para jusante pela ação da água superficial; gradação periódica e corrosão.

Fonte: Adaptado de Christofolletti (1980) e Cassetti (2005).

Atualmente as técnicas de Geoprocessamento aliadas aos produtos de Sensoriamento Remoto, oferecem inúmeras possibilidades de análise e estudo dessas áreas com potencial ao desencadeamento de movimentação de massas, utilizando a análise digital do relevo por meio do Modelo Digital do Terreno – MDT (SILVEIRA *et al.*, 2014). A evolução e a disponibilidade de imagens ópticas e de Radar tem favorecido e facilitado o estudo da possibilidade de riscos geológicos, podendo definir assim uma melhor gestão territorial, ou seja, auxiliando no processo de tomada de decisão a respeito da ocupação destes espaços e seus usos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS APLICADOS

Atualmente a análise multicritério é uma ferramenta importante para a tomada de decisão em muitas áreas do conhecimento como a saúde, a educação, a administração, a economia e principalmente para as áreas de ciências da Terra e ambiental. A análise multicritérios é um método de análise de alternativas para resolução de problema que utiliza vários critérios relacionados ao objeto de estudo, sendo possível identificar e hierarquizar as alternativas para o objetivo considerado (FRANCISCO *et al.*, 2007; SARTORI, 2010). Esse tipo de análise normalmente requer que primeiro se realize a padronização dos valores atribuídos a cada critério, visto que na maioria das vezes eles apresentam unidades diferentes, sendo ela analisada por diversas maneiras, utilizando inúmeros métodos diferentes com aplicabilidade em áreas de conhecimento distintas (CORSEUIL, 2006).

A análise multicritérios em ambiente SIG, consiste no cruzamento de planos informações que precisam estar previamente hierarquizados para poder analisar um fenômeno, no entanto para hierarquizar os planos de informações pode ser utilizado vários métodos diferentes, como lógica Fuzzy, Delphi, AHP, entre outros.

O método Delphi é muito utilizado, principalmente, na área da Saúde (ÁVILA, 2015; TRICCO *et al.*, 2015), mas também pode ser aplicado na Geociências para a ponderação de escala de pesos para uma tomada de decisão. Esse método é adequado para permitir que especialistas possam chegar a um acordo sobre

determinado tema (MEIJERING *et al.*, 2015). Este método baseia-se na escolha de um grupo multidisciplinar que conheça bem o fenômeno a ser investigado, esse grupo inclui especialistas, pesquisadores ligados a Universidade, órgãos públicos e também do setor privado. Esses analistas além de conhecer o fenômeno e casos da Geociências, seria interessante que eles também conheçam a realidade espacial onde os fenômenos se localizam (MOURA, 2007; ASL *et al.*, 2012; HSUEH, 2015). De acordo com Moura (2007), no caso da Geociências, além dos especialistas opinarem sobre a hierarquia das variáveis, onde eles atribuem notas, que pode ser dada em uma escala de valores entre 0 a 10 para cada componente da legenda, eles também opinam sobre o grau de pertinência para cada variável dada em porcentagem. Este método é subjetivo baseado no conhecimento dos analistas em relação as variáveis e do fenômeno avaliado.

Já o método AHP (Analytical Hierarchy Process), desenvolvido por Saaty em 1977, consiste numa técnica de escolha baseada na lógica de comparação pareada. Nesse método, os diferentes critérios que influenciam a tomada de decisão são comparados dois a dois, sendo atribuído um valor de julgamento ao relacionamento entre eles, conforme uma escala pré-definida, onde Saaty (1980) propôs uma escala de comparação com nove pontos que manifesta o grau de importância entre eles (Tabela 2). A definição dos valores de importância entre os critérios determina os dados de entrada na matriz de comparação pareada e a partir deles são calculados os pesos ponderados dos fatores (CORSEUIL, 2006).

O método AHP, assim como outros, auxilia na ponderação dos valores de contribuição das componentes envolvidas no estudo, também exige um conhecimento prévio do especialista sobre o fenômeno investigado e o grau de importância de seus fatores desencadeadores, ou seja, ao decidir o problema a ser estudado, o especialista precisa estar ciente do grau de hierarquia de cada componente para poder organizá-las por ordem de prioridade em relação a probabilidade que elas possuem em desencadear certo fenômeno (SAATY, 2008).

Para fazer a identificação das áreas com maiores suscetibilidades ao desenvolvimento de movimentos de massa foram feitas uma série de análises multicritérios em ambiente SIG por meio da operação álgebra de mapas, utilizando a Média Ponderada (1), onde para aplicação desse método foram definidos uma escala de valores (pesos) de 0-10 para as componentes (legendas) das variáveis e influências em porcentagem para cada variável (plano de informação) para a realização do cálculo.

$$\begin{aligned}
 \text{Carta de Suscetibilidade à Movimentos de Massa} = & (\text{variável 1} * \text{influencia\%}) + (\text{variável 2} * \text{influencia\%}) + \\
 & (\text{variável 3} * \text{influencia\%}) + (\text{variável n} * \text{influencia\%})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Os valores (ponderação) dos pesos de cada componente das variáveis foram definidos com base na adaptação do método Delphi. No caso do trabalho em questão, a equipe que atribuiu notas foram os autores do trabalho com base na literatura especializada no assunto, e em seus conhecimentos em relação as variáveis envolvidas. No entanto, estavam cientes da responsabilidade dos valores atribuídos. Esses valores foram atribuídos com relação a probabilidade que cada componente envolvida tem de desencadear os movimentos de massa, de acordo com as propriedades individuais de cada componente envolvida, os pesos atribuídos variaram de 0 a 10, onde os valores mais próximos de “0” correspondem as menores probabilidades de desencadear um possível movimento de massa, os valores intermediários as médias probabilidades e os valores mais próximos de “10” as maiores probabilidades.

Ainda com base no conhecimento das variáveis (Tabela 3) e da área de estudo e a partir do método AHP foram definidas as influências em porcentagem (%) para cada variável integrada no cálculo para geração das cartas de avaliação de suscetibilidade à movimentos de massa, onde o total dessas influências para cada mapa somam 100%, sendo que as maiores fatias de porcentagem são atribuídas a variável que tem a maior contribuição para desencadear a movimentação de massa.

Tabela 2: Escala numérica de relativa importância de Saaty

Escala	Avaliação Numérica	Recíproco
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito fortemente preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Fonte: Saaty (2005) e Vargas (2015).

Tabela 3: Significado e importância de cada sigla das variáveis usadas no cálculo das cartas

Variáveis		Importância
CV	Curvatura Vertical	Diz respeito a forma da vertente, côncava, convexa ou retilínea, pode definir os pontos de maior erosão e acumulação de sedimentos.
D	Declividade	Nível de inclinação do terreno, pode definir uma maior capacidade de escoamento ou infiltração do terreno.
OV	Orientação de Vertente	Importante para entender a direção das linhas de fluxos (água e sedimentos), possui correlação com o clima e o grau de insolação recebida pelas vertentes
CH	Curvatura Horizontal	Indica padrões de divergência ou convergência das linhas de fluxos de água e sedimentos
H	Hipsometria	Altitude do terreno.
V	Vegetação	Cobertura e proteção do solo.
S	Solo	Os tipos de solos podem indicar uma maior ou menor porosidade e capacidade de retenção de água no terreno.
DL	Densidade de Lineamento	Pode indicar as fragilidades, falhas e fraturas do terreno.
G	Geologia	O tipo de substrato rochoso pode inferir uma maior ou menor desagregação das rochas
CUT	Cobertura e Uso da Terra	Indica o tipo de ocupação do terreno, situação da vegetação, (densa ou aberta), do solo (exposto).

Para definir as influências de cada variável em porcentagem no cálculo da média ponderada, feita pela álgebra de mapas, foi aplicado o método AHP, onde foi desenvolvida uma matriz (Tabelas 4, 6 e 8) para cada carta com as variáveis utilizadas e seus respectivos graus

de importância em desencadear movimentos de massa. Essas matrizes foram normalizadas e também foram calculados os autos vetores para cada variável de cada matriz. Sendo assim os valores dos autovetores, que totalizam 1 (ou 100%), representam as influências de cada plano de informação para o cálculo das cartas (Tabelas 5, 7, 9).

Tabela 4: Matriz desenvolvida para ponderar as influências das variáveis da Carta de Avaliação de Suscetibilidade de Morfológica (CASMO)

Class	D	CV	CH	OV
D	1	9	7	7
CV	1/9	1	9	7
CH	1/7	1/9	1	3
OV	1/7	1/7	1/3	1
Total	1,40	10,25	17,33	18,00

Tabela 5: Valores de normalização da matriz da Tabela 3 e o resultado dos autovetores (em %) de cada variável do CASMO

Class	D	CV	CH	OV	Soma	(%)
D	0,71	0,88	0,40	0,39	2,39	59,66
CV	0,08	0,10	0,52	0,39	1,08	27,13
CH	0,10	0,01	0,06	0,17	0,34	8,44
OV	0,10	0,01	0,02	0,06	0,19	4,77
Total						100,00

Tabela 6: Matriz desenvolvida para ponderar as influências das variáveis da Carta de Avaliação de Suscetibilidade Ambiental (CASAM)

Class	D	CUT	CV	CH	OV
D	1	7	9	7	9
CUT	1/7	1	7	9	7
CV	1/9	1/7	1	3	5
CH	1/7	1/9	1/3	1	5
OV	1/9	1/7	1/5	1/5	1
Soma	1,51	8,40	17,53	20,20	27,00

Tabela 7: Valores da normalização da matriz da Tabela 5 e o resultado dos autovetores (em %) de cada variável do CASAM

Class	D	CUT	CV	CH	OV	Soma	(%)
D	0,66	0,83	0,51	0,35	0,33	2,69	53,80
CUT	0,09	0,12	0,40	0,45	0,26	1,32	26,36
CV	0,07	0,02	0,06	0,15	0,18	0,48	9,63
CH	0,09	0,01	0,02	0,05	0,18	0,36	7,23
OV	0,07	0,02	0,01	0,01	0,04	0,15	2,98
Total							100,00

Tabela 8: Matriz desenvolvida para ponderar as influências das variáveis da Carta de Avaliação de Suscetibilidade de Natural (CASNA)

Class	D	CV	CH	S	OV	V	G	DL	H
D	1	7	9	7	7	5	5	9	7
CV	1/7	1	9	9	7	7	7	9	7
CH	1/9	1/9	1	3	5	5	7	3	5
S	1/7	1/9	1/3	1	3	3	7	3	3
OV	1/7	1/7	1/5	1/3	1	3	9	3	3
V	1/5	1/7	1/5	1/3	1	1	5	3	5
G	1/5	1/7	1/7	1/7	1/9	1/5	1	3	5
DL	1/9	1/9	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	5
H	1/7	1/7	1/5	1/3	1/3	1/5	1/5	1/5	1
Total	2,19	8,90	20,41	21,48	24,78	24,73	41,53	34,20	41,00

Tabela 9: Valores da normalização da matriz da Tabela 7 e o resultado dos autovetores (em %) de cada variável do CASNA

Class	D	CV	CH	S	OV	V	G	DL	H	Soma	(%)
D	0,46	0,79	0,44	0,33	0,28	0,20	0,12	0,26	0,17	3,05	33,86
CV	0,06	0,11	0,44	0,42	0,28	0,28	0,17	0,26	0,17	2,20	24,50
CH	0,05	0,01	0,05	0,14	0,20	0,20	0,17	0,09	0,12	1,03	11,50
S	0,06	0,01	0,02	0,05	0,12	0,12	0,17	0,09	0,07	0,71	7,91
OV	0,06	0,02	0,01	0,02	0,04	0,12	0,22	0,09	0,07	0,65	7,17
V	0,09	0,02	0,01	0,02	0,04	0,04	0,12	0,09	0,12	0,54	6,05
G	0,09	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,09	0,12	0,37	4,08
DL	0,05	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,12	0,28	3,12
H	0,06	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,16	1,81
Total											100,00

Depois de ponderar as variáveis e de realizar os cálculos de álgebra de mapas, os resultados foram apresentados em formato raster com classes de suscetibilidades diferentes, sendo as classes representadas em cinco níveis de suscetibilidade à movimentos de massa (Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto, Muito Alto). Para melhor avaliar a possibilidade de ocorrência dos movimentos de massa no terreno, foram elaborados cinco perfis topográficos que pudessem representar as análises feitas. A escolha dos perfis foi com base nos que apresentaram melhor representatividades para todas variáveis morfométricas vistas em campo e que pudessem cobrir toda área estudada (Figura 5).

A utilização do método AHP vem se consolidando na área da Geociências principalmente para atribuir valores as variáveis utilizadas na elaboração de mapas de suscetibilidade à movimentos de massa ou à erosão, a exemplo dos trabalhos de

Ghosh *et al.* (2011), que utilizou o método AHP para mapear suscetibilidade de deslizamentos de terra em Darjeeling Himalayas (Índia). Souza *et al.* (2015) e Silva e Machado (2014) usaram para mapear suscetibilidade à erosão, onde esse método apesar de suas limitações, ainda pode ser uma boa ferramenta para a ponderação das variáveis na elaboração dos mapas.

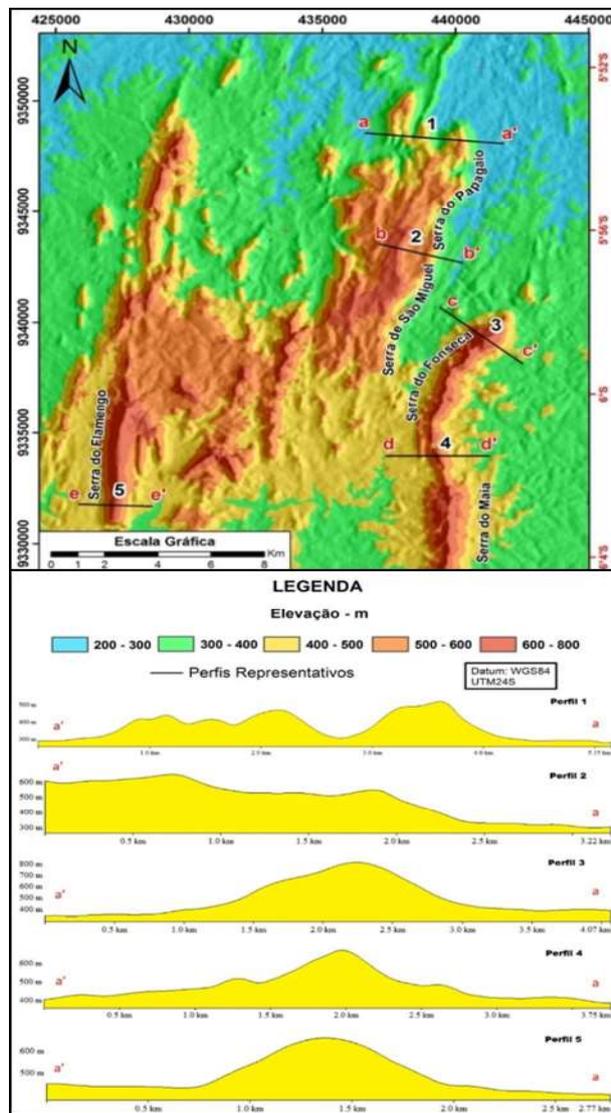


Fig. 5 – Mapas dos perfis representativos das encostas das serras do (1) Papagaio, (2) São Miguel, (3) do Fonseca, (4) Maia e (5) Flamengo, respectivamente.

3. ANÁLISES E DISCUSSÕES

Para realizar a discussão a respeito da contribuição morfológica do terreno para análise do potencial de ocorrência da movimentação de massa no Maciço Central do Ceará antes foram realizados alguns testes com os MDT do

TOPODATA, SRTM e ASTER-GDEM, avaliados em função do acesso gratuito na internet, para definir quais dos modelos seria melhor para representar as quatro variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e curvatura horizontal). Segundo Carmo *et al.* (2015a), o MDT extraído do TOPODATA obteve os melhores resultados para a geração dessas variáveis morfométricas, tanto em qualidade dos produtos obtidos, como na escala que se desejava trabalhar, neste caso seria na escala de 1:25.000. Esses dados gerados a partir do TOPODATA (Figura 6) foram validados em campo, e após a validação pôde-se ter a segurança para fazer a integração deles para servir como base na geração das três Cartas de Suscetibilidade à Movimentos de Massa.

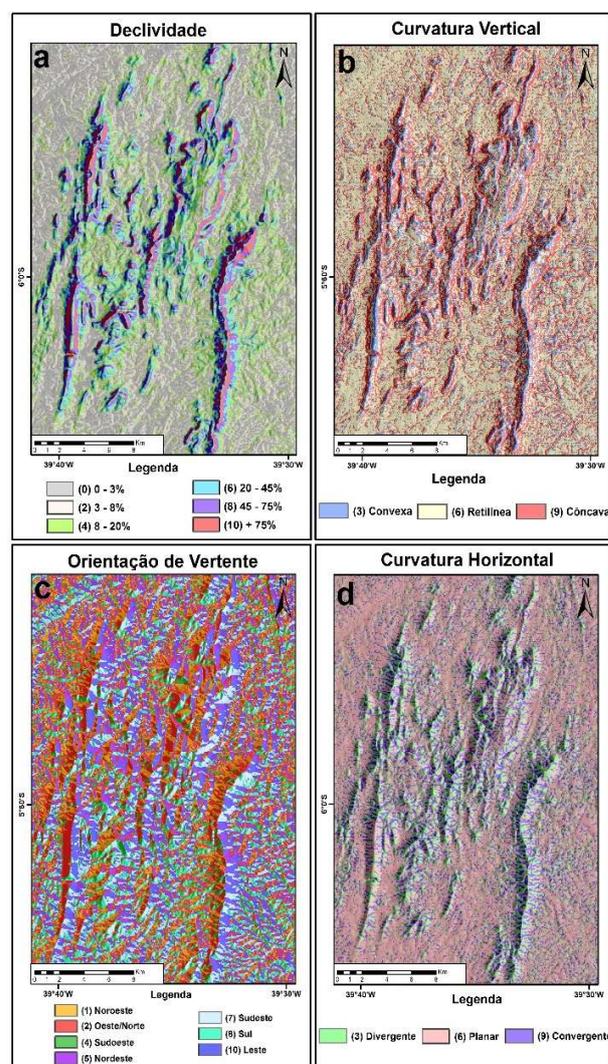


Fig. 6 – Mapas das variáveis morfométricas: (a) Declividade, (b) Curvatura Vertical, (c) Orientação de Vertente e (d) Curvatura Horizontal, respectivamente.

A primeira carta obtida, a Carta de Avaliação de Suscetibilidade Morfológica (CASMO), foi gerada a partir da combinação das quatro variáveis morfométricas (declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal e orientação de vertentes), como forma de analisar a suscetibilidade levando em conta somente as formas de relevo das encostas. Com base nesta carta, pôde-se depois comparar com as demais cartas confeccionadas, que levavam em conta outras variáveis.

A segunda carta, a Carta de Avaliação de Suscetibilidade Ambiental (CASAM), integrou também as quatro variáveis morfométricas diretamente com as informações do Mapa de Cobertura e Uso da Terra (Figura 7a), obtidas por meio da classificação supervisionada feita a partir da imagem do sensor OLI (Landsat 8).

As informações extraídas do Mapa de Cobertura e Uso da Terra refletem as ações antrópicas, ou seja, as modificações na paisagem feitas pelas atividades de ocupação do homem no terreno, e os demais mapas temáticos correspondem as informações naturais, sem interferências antrópicas, cuja terceira e última carta, a Carta de Avaliação de Suscetibilidade Natural (CASNA), integrou as quatro variáveis morfométricas com essas informações hipsométricas, geológicas, pedológicas e de vegetação (Figura 7), onde nesta carta leva-se em questão somente as informações naturais.

Todos os planos de informações (Figuras 6 e 7) utilizados para a confecção das cartas receberam valores para cada item de suas legendas (Tabela 10), onde esses valores foram atribuídos de acordo com a probabilidade de desencadear movimentos de massa no terreno.

3.1 Carta de Avaliação de Suscetibilidade Morfológica (CASMO)

Na avaliação de suscetibilidade morfológica foram utilizadas apenas as informações das variáveis morfométricas obtidas do MDT do TOPODATA, onde a variável da declividade do terreno obteve a maior influência em (%) entre as demais no cálculo efetuado (Tabela 11), pois a declividade determina o nível de inclinação da encosta, definindo assim o grau de erosão que possa ocorrer no terreno, determinados pelos processos geomorfológicos que ocorrem na vertente (PRADHAN, 2010). A menor influência colocada no cálculo feito foi atribuída a orientação de vertente, nesse caso o

sentido para onde as vertentes estão orientadas não possui muita importância, no entanto se o cálculo envolvesse quantidade e direção das precipitações pluviométricas, esta variável teria uma influência maior na operação final.

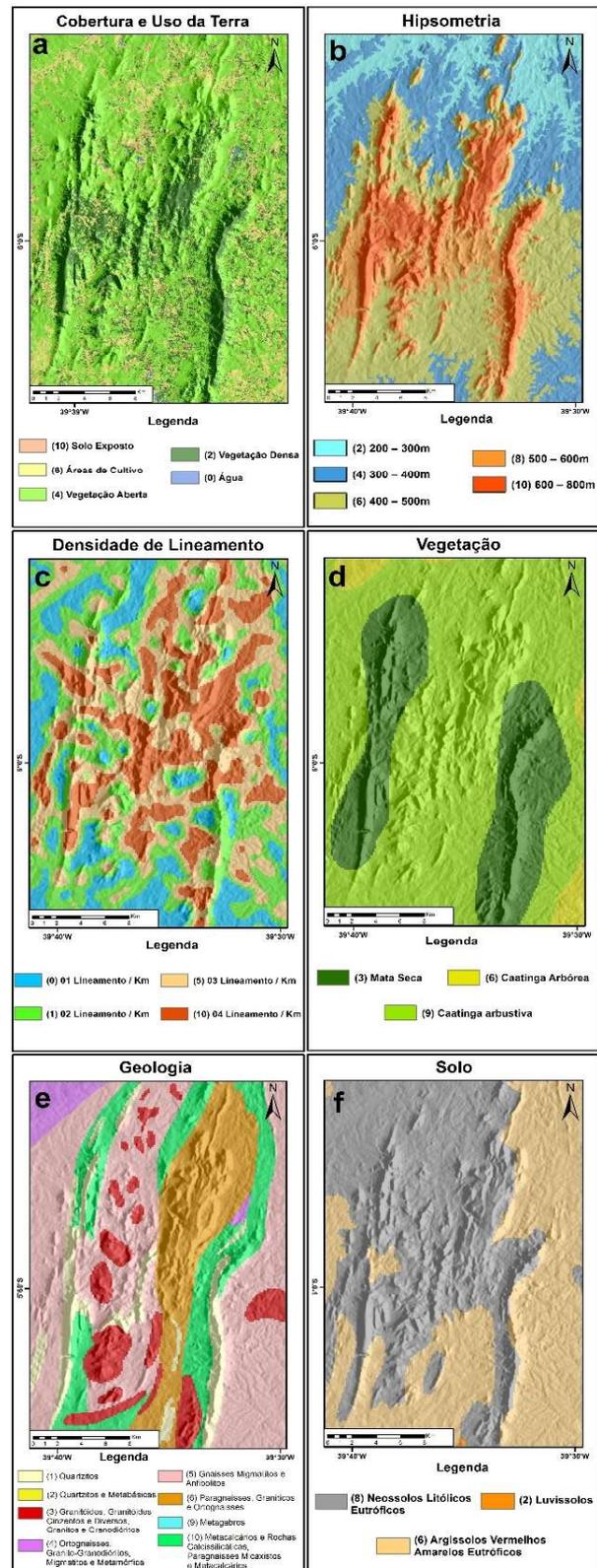


Fig. 7 - Mapas temáticos: (a) Cobertura e Uso da Terra, (b) Hipsometria, (c) Densidade de Lineamento, (d) Vegetação, (e) Geologia e (f) Solo.

Tabela 10: Tabela dos pesos utilizados na operação de álgebra de mapas para calcular suscetibilidade à movimentos de massa para as três cartas geradas

VARIÁVEIS	Pesos
DECLIVIDADE (D)	
0 – 3%	0
3 – 8%	2
8 – 20%	4
20 – 45%	6
45 – 75%	8
75%	10
ORIENTAÇÃO DE VERTENTES (OV)	
Noroeste	1
Oeste/Norte	2
Sudoeste	4
Nordeste	5
Sudeste	7
Sul	8
Leste	10
CURVATURA VERTICAL (CV)	
Convexa	3
Retilínea	6
Côncava	9
CURVATURA HORIZONTAL (CH)	
Divergente	3
Planar	6
Convergente	9
HIPSOMETRIA (H)	
200 – 300m	2
300 – 400m	4
400 – 500m	6
500 – 600m	8
600 – 800m	10
COBERTURA E USO DA TERRA (CUT)	
Água	0
Água	2
Vegetação Aberta	4
Áreas de Cultivo	6
SOLO (S)	
Luvissolos	2
Argissolos Vermelhos Amarelos Eutróficos	6
Neossolos Litólicos Eutróficos	8
VEGETAÇÃO (V)	
Mata Seca	3
Caatinga arbórea	6
Caatinga arbustiva	9
DENSIDADE DE LINEAMENTOS (DL) (população/km²)	
1	0
2	1
3	5
4	10
GEOLOGIA (G)	
Quartzitos	1
Quartzitos e Metabásicas	2
Granitóides	3
Granitóides Cinzentos	3
Granitóides Diversos	3
Granitos e Granodioritos	3
Ortognaisses Granito-Granodioritos	4
Ortognaisses, Migmatitos e Metamórfica	4
Gnaisses Migmatitos e Anfíbolitos	5
Paragnaisses e Ortognaisses graníticos	6
Metagabros	9
Metacalcários e Rochas Calcissilicáticas	10
Paragnaisses Micaxistos e Metacalcários	10

Tabela 11: Tabela das influências (%) utilizadas na operação de álgebra de mapas para calcular a suscetibilidade à movimentos de massa baseando-se na morfologia do terreno (Figura 8)

VARÁVEL	INFLUÊNCIA
Declividade	59,66%
Curvatura Vertical	27,13%
Curvatura Horizontal	8,44%
Orientação de Vertentes	4,77%

A morfologia do terreno é o indicador natural mais importante com relação a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa, pois ela define os padrões e os tipos de processos geomorfológicos podem ocorrer no terreno, principalmente em encostas íngremes, onde esses processos podem se dar de forma mais branda ou catastrófica com o desencadeamento dos movimentos de massas mais violentos, como os deslizamentos, corridas de lama e queda de blocos, que por sua vez também dependem de outros fatores como a vegetação, a quantidade de água envolvida e o tipo de material envolvendo essa vertente, como o tipo de solo que é composto. No entanto, a inclinação da vertente ainda é o fator mais importante para definição do grau de suscetibilidade de ocorrências da movimentação de massa. Nesse sentido a CASMO foi confeccionada utilizando como base a inclinação e morfologia do terreno (2). Logo, a fórmula matemática para geração da carta foi a seguinte:

$$CASMO = (\text{declividade} * 0,35) + (\text{curvatura vertical} * 0,30) + (\text{curvatura horizontal} * 0,20) + (\text{orientação de vertente} * 0,15) \quad (2)$$

De modo geral, a avaliação de suscetibilidade de risco morfológica apresentou níveis de suscetibilidade elevadas na maioria das vertentes e níveis baixos nos topos, nos sopés e na Depressão Periférica (Figura 8). Os níveis de suscetibilidade obedeceram à lógica da declividade e dos tipos de curvatura vertical. A carta indicou que os locais onde o terreno ofereceu as maiores suscetibilidades à movimentos de massa, que estão situados nas encostas das serras, principalmente na vertente Leste da Serra do Fonseca, representada no (Perfil 3 c-c', Figura 5). Esse perfil apresentou vertentes convexa/retilínea/ côncava com declividade

muito elevada, que são fatores preponderantes para elevar o grau de suscetibilidades neste setor da área estudada.

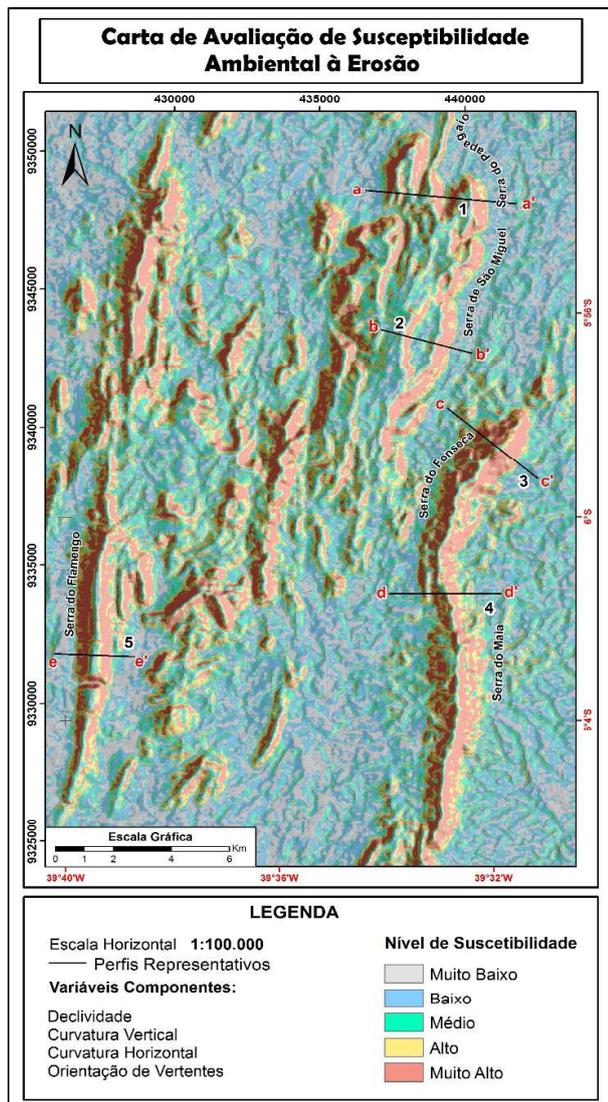


Fig. 8 – CASMO dada pelas variáveis morfométricas, declividade, orientação de vertentes, curvaturas vertical e horizontal.

Alguns setores das encostas da Serra do Maia apresentaram suscetibilidade de nível moderado, principalmente no setor Oeste, contrapondo com as suscetibilidades elevadas na maior parte do setor Leste e nos locais próximos ao topo, onde apresentaram altas declividades e curvaturas retilíneas (Perfil 4 d-d', Figura 5). A Serra do Flamengo mostrou uma área de suscetibilidade baixa no seu topo, no entanto nas vertentes, principalmente nas encostas Leste dessa serra, apresentaram suscetibilidade muito alta. Como mostrou os prováveis motivos pelos quais possa ter ocorrido essa peculiaridade no

nível de suscetibilidade baixa no topo da vertente poderia ser atribuído ao fato do cume possuir uma área considerável de relevo plano. Já as vertentes, principalmente, a Leste apresentaram declives acentuados dispostos ao longo das superfícies retilíneas, aos quais estão presentes em quase toda área nas encostas desta serra (Perfil 5 e-e', Figura 5).

A CASMO (Figura 8) indicou ainda que nas serras do Papagaio (Perfil 1 a-a', Figura 5) e de São Miguel (Perfil 2 b-b', Figura 6) as encostas foram avaliadas como suscetibilidades considerados altas a muito altas, porém nos topos dessas serras a topografia é mais suave e apresentaram níveis que variam de médio a baixo grau quanto a suscetibilidade à movimentos de massa. Essas serras possuem ainda uma quantidade razoável de área topograficamente elevada, onde a extensão de terra é marcada por vales e interflúvios com declives suaves.

3.2 Carta de Avaliação de Suscetibilidade Ambiental (CASAM)

Na análise da suscetibilidade ambiental foi utilizada como principais variáveis a Declividade e a Cobertura e Uso da Terra (água, vegetação densa, vegetação aberta, área de cultivos e solo exposto), que caracterizam as unidades de paisagens do terreno modificadas pelas atividades antrópicas, o que permite estabelecer a avaliação ambiental para região estudada. Os valores das influências atribuídos a essa variável, bem como as outras variáveis, permitiram definir os pontos de maiores e de menores grau de suscetibilidade à movimentos de massa (Tabela 12).

Para o cálculo da CASAM (Figura 9) considerou-se nesse caso que as informações contidas no Mapa de Cobertura e Uso da Terra teriam a segunda maior influência, sendo que a Declividade, assim como nas outras cartas, continua obtendo uma maior influência em relação as demais variáveis impostas nos cálculos (Tabela 12).

Logo, a fórmula matemática para geração desta carta foi a seguinte:

$$CASAM = (cobertura\ e\ uso\ da\ Terra * 0,35) + (curvatura\ vertical * 0,20) + (curvatura\ horizontal * 0,10) + (orientação\ de\ vertente * 0,10) + (declividade * 0,25) \quad (3)$$

Tab. 12 – Tabela das influências (%) de cada variável utilizadas na operação de álgebra de mapas para calcular a CASAM, baseando-se nas Variáveis Morfométricas e na Cobertura e Uso da Terra (Figura 9).

VARÁVEL	INFLUÊNCIA
Declividade	53,80%
Cobertura e Uso da Terra	26,36%
Curvatura Vertical	9,63%
Curvatura Horizontal	7,23%
Orientação de vertentes	2,98%

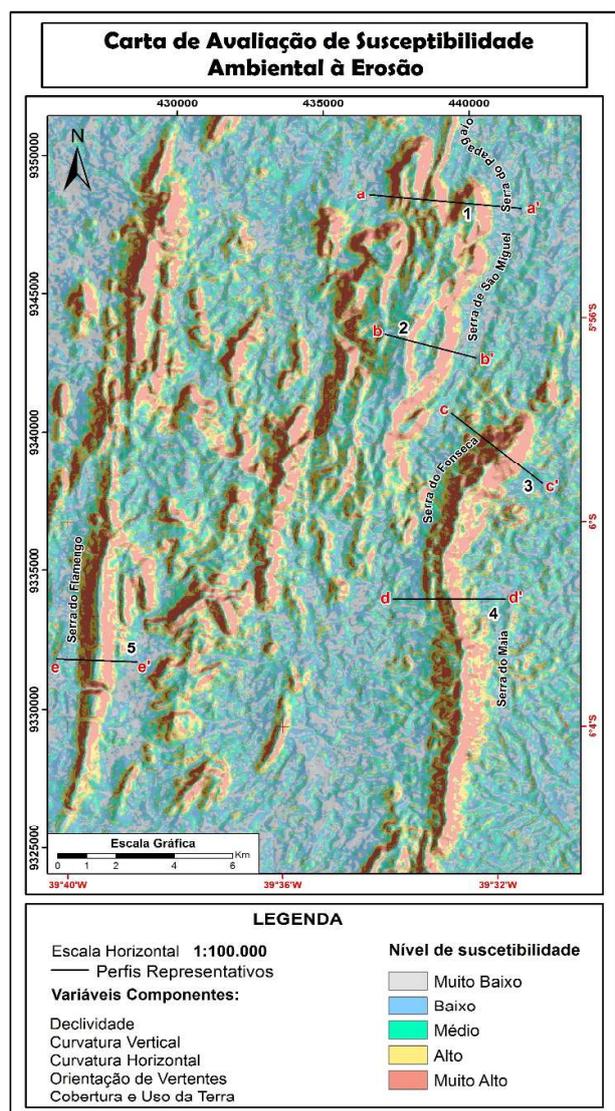


Fig. 9 – CASAM dada pelas Variáveis Morfométricas e Cobertura e Uso da Terra.

As unidades de Cobertura e Uso da Terra podem aumentar ou diminuir a fragilidade do terreno em relação suscetibilidade de ocorrências dos movimentos de massa. A vegetação fechada, caracterizada pela vegetação de caatinga arbórea-arbustiva, pode minimizar a possibilidade de

possíveis processos geomorfológicos mais severos, mesmo em terrenos inclinados, o contrário ocorre com o solo exposto, que possibilita aumentar consideravelmente a possibilidade de haver uma erosão drástica ou até mesmo um movimento de massa em encostas íngremes. Já as áreas de cultivo, assim como a de vegetação aberta (vegetação de caatinga arbustiva-rasteira), podem aumentar consideravelmente a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa principalmente em vertentes inclinadas. Com base nestas características e observações feitas em campo, foram definidos os pesos diferenciados, além de ter colocado a variável do Mapa de Cobertura e Uso da Terra com maior influência na avaliação feita, pela importância na análise das ações antrópicas pertinentes ao terreno, dando a visão ambiental do processo (CARMO *et al.*, 2015b).

Nesse caso a ação antrópica é preponderante para a análise de suscetibilidade, pois o ato de cultivar a terra deixa o ambiente mais fragilizado e mais suscetível à erosão e também à movimentos de massa, pois para desenvolver seus cultivos é necessário a retirada da vegetação mais densa para fazer o plantio, após a colheita esses locais dificilmente voltam com a mesma vegetação de antes, dando lugar assim aos solos expostos e/ou a vegetação mais aberta. Levando em consideração esse equilíbrio tênue podemos constatar que a variável Cobertura e Uso da Terra pode ser considerada, assim como a morfologia do terreno, como importante quando se analisa o grau e a probabilidade de ocorrer uma erosão mais acentuada e até um movimento de massa ou não no terreno.

Os resultados apresentados na carta da Figura 09 mostraram que em grande parte das encostas ocorre uma suscetibilidade alta a muito alta, principalmente onde se verificou uma diminuição da vegetação densa e a presença de declividades mais acentuada. As suscetibilidades consideradas muito altas estão localizados principalmente nas vertentes Leste das Serras do Papagaio (Perfil 1 a-a', Figura 5), São Miguel (Perfil 2 a-a', Figura 5), Fonseca (Perfil 3 a-a', Figura 5), Maia (Perfil 4 a-a', Figura 5) e Flamengo (Perfil 5 a-a', Figura 5).

Nas vertentes Oeste dessas serras os graus de suscetibilidades considerados alto a muito alto ficaram restritos a locais pontuais onde

as declividades são maiores. Nessas vertentes verificou-se ainda que a vegetação é mais densa formando assim uma proteção natural em grande parte dessas encostas. Verificou-se também que nas áreas de relevos suaves também ocorreu pontos de grau elevados (alto a muito alto), esses pontos coincidem com as regiões de vegetação aberta, com as áreas de cultivos e principalmente com as manchas de solos expostos.

Em grande parte dos topos das serras e na depressão periférica os graus de suscetibilidades à movimentos de massa variaram de muito baixo a moderado, no entanto há pontos de suscetibilidades alta a muito alta. Essas áreas com suscetibilidades consideradas baixas estão recobertas por vegetação densa que diminuem bastante a suscetibilidades ou por espelhos d'água rasos, que por sua vez praticamente anula a possibilidade de haver movimentos de massa nesses locais recobertos por espelhos d'água.

3.3 Carta de Avaliação de Suscetibilidade Natural (CASNA)

Para fazer a análise de suscetibilidade natural foram realizados vários testes utilizando nove variáveis (declividade, orientação de vertente, curvatura vertical, curvatura horizontal, hipsometria, densidade de lineamentos, geologia, vegetação e solos) com influências distintas (Tabela 13), esses testes resultaram em um arquivo raster com as informações de graus de riscos distintos.

Tabela 13: Tabela das influências (%) utilizadas na operação de álgebra de mapas para calcular a CASNA, baseando-se nas Variáveis Morfométricas, Vegetação, Solo, Densidade de Lineamentos e Geologia (Figura 10)

VARÁVEL	INFLUÊNCIA
Declividade	33,86%
Curvatura Vertical	24,50%
Curvatura Horizontal	11,50%
Solo	7,91%
Orientação de Vertentes	7,17%
Vegetação	6,05%
Geologia	4,08%
Densidade de Lineamentos	3,12%
Hipsometria	1,81%

A fórmula matemática para geração dessa carta foi a seguinte:

$$\begin{aligned}
 CASNA = & (\text{declividade} * 0,17) + (\text{curvatura} \\
 & \text{vertical} * 0,15) + (\text{curvatura horizontal} * 0,09) \\
 & + (\text{orientação de vertente} * 0,05) + \\
 & (\text{hipsometria} * 0,07) + (\text{vegetação} * 0,12) + \\
 & (\text{solo} * 0,14) + (\text{densidade de lineamentos} * 0,11) \\
 & + (\text{geologia} * 0,10)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

A CASNA apresentou uma espacialização dos graus de suscetibilidade parecida com aqueles mostrados nas outras cartas de avaliação de suscetibilidade. Essa carta (Figura 10) elevou muito a possibilidade da região testada está dentro de uma zona de alta suscetibilidade à movimentos de massa, fato que poderia ser preocupante, caso não fosse feita uma análise mais criteriosa para poder averiguar se ela realmente pode representar a realidade do terreno da área de estudo.

Os resultados do cálculo de suscetibilidade apresentados na CASNA mostraram a distribuição geográfica dos níveis de suscetibilidade à movimentos de massa, onde grande parte da área de estudo ficou recoberta por suscetibilidades de grau alto a muito alto, principalmente na região Central e Norte do Maciço onde estão localizadas as Serras do Papagaio (Perfil 1 a-a', Figura 5), São Miguel (Perfil 2 b-b', Figura 5) e Fonseca (Perfil 3 c-c', Figura 5). No setor Sul predominou os níveis de médio a baixo, onde os graus de suscetibilidades mais altos estão situados nas vertentes da Serra do Flamengo (Perfil 5 e-e', Figura 5) e em alguns pontos enclaustrados na Depressão Periférica.

Um ponto de incoerência em relação ao nível suscetibilidade está localizado na porção central das vertentes da Serra do Maia (Perfil 4 d-d', Figura 5), na qual as suscetibilidades apontadas estão entre moderada a baixa, contradizendo os níveis mostrados nas outras cartas apresentadas. Esses resultados apresentados na maior parte da área de estudo estão em parte em desacordo com as declividades e com a morfologia do terreno apesar desses variáveis terem recebido uma maior influência(%) no cálculo do mapa.

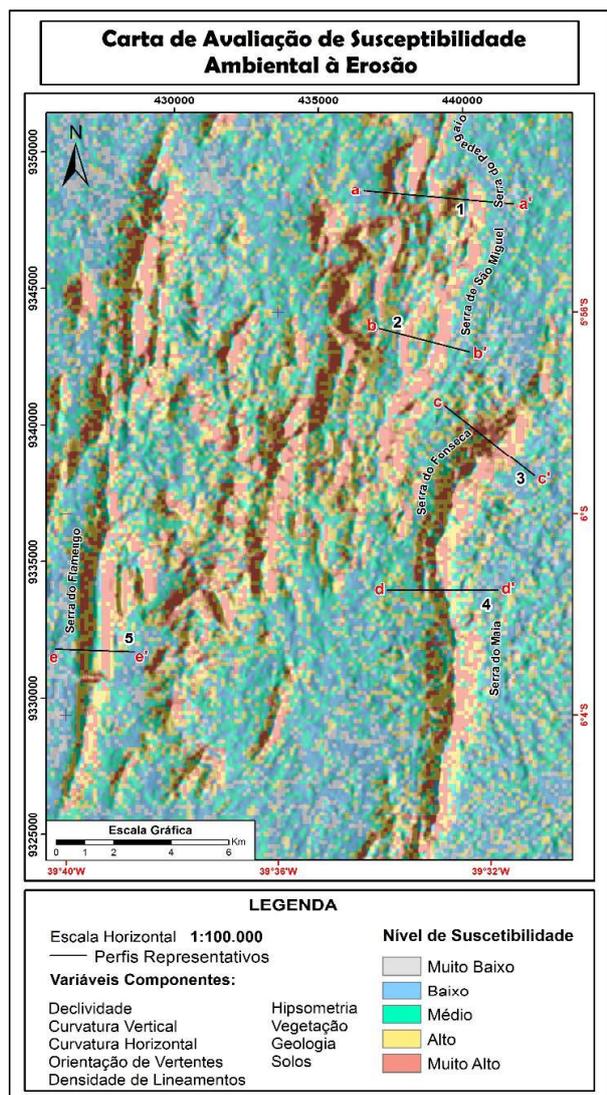


Fig. 10 – CASNA, baseando-se nas Variáveis Morfométricas, Vegetação, Solo, Densidade de Lineamentos e Geologia.

Os resultados apontados nesta carta podem estar relacionados a quantidade de informações cruzadas para derivar o produto final, ou por incompatibilidade de escalas, talvez essas informações necessitassem passar por uma avaliação mais criteriosa para que fossem melhoradas. Outro ponto a ser destacado nessa carta foi a apresentação dos pixels na imagem, observa-se que eles estão mostrando sua capacidade máxima de resolução, apresentando uma clara delimitação entre eles. Essa carta pode levantar uma discussão bastante pertinente a respeito das bases de dados utilizadas para o cálculo das áreas com possibilidades de movimentos de massa. As bases originais dos mapas de geologia, de solo e de vegetação foram adquiridos na escala de 1:500.000, enquanto os outros dados foram adquiridos

na escala de 1:100.000, ocasionando assim uma incompatibilidade de escalas. Identificar suscetibilidades mais localizadas com esse tipo de base não é muito confiável, o ideal (recomendado) seria fazer um mapeamento mais detalhado da Geologia, dos tipos de solos e da vegetação natural.

As três cartas apresentaram resultados bem semelhantes apesar da terceira carta apresentar problemas em relação as escalas dos planos de informações. Todas as cartas apresentaram valores de suscetibilidades mais elevadas nas vertentes das serras e valores mais baixos nas regiões com topografias mais suaves.

4. CONCLUSÃO

O trabalho teve como intuito apresentar Cartas de Suscetibilidade à Movimentos de Massa a partir de produtos de Sensores Remotos e aplicação de técnicas de Geoprocessamento. As variáveis envolvidas nesta análise foram a partir de informações: morfológicas, que tiveram sempre o maior peso; ambiental, para avaliar o envolvimento das ações antrópicas no processo; e natural, que envolveu diversas informações (geologia, pedologia e hipsometria). Os resultados obtidos se mostraram eficazes na análise da suscetibilidade à movimentos de massa, cujas cartas geradas apresentaram similaridades entre si, com certas diferenças ocasionadas por características individuais das variáveis envolvidas em cada tipo de carta confeccionada.

Os produtos de Sensoriamento Remoto utilizados se mostraram eficazes para geração de cartas na escala de 1:25.000, possibilitando uma análise mais confiável e próxima da realidade. Podendo destacar que o dado TOPODATA foi importante para isso, pois foi do MDT que foram extraídas as variáveis morfométricas (declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical). Além disso, a imagem do Landsat 8 – OLI possibilitou pelo método de classificação supervisionada na confecção do Mapa de Cobertura e Uso da Terra, importante para caracterização ambiental da área de estudo, onde as áreas modificadas pelo homem foram mapeadas.

A aplicação de técnicas de Geoprocessamento possibilitou no cálculo complexo da matemática envolvida entre os mapas utilizados

para geração das cartas de suscetibilidade à movimentos de massa, que envolveu cálculos em matriz entre os dados para determinação dos valores dos pesos e das influências das variáveis envolvidas pelos métodos Delphi e AHP. Além de que foi importante o conhecimento dos fenômenos envolvidos pelos autores para determinação dos valores de algumas informações variáveis, pois apesar do cálculo estatístico a avaliação subjetiva não teve como ser descartada para avaliação da suscetibilidade analisada.

Com base nos produtos, métodos e resultados obtidos pôde-se concluir que a CASMO e CASAM obtiveram grandes similaridades no grau de suscetibilidade avaliado, tendo pequenas diferenças relacionadas as informações relacionadas a Cobertura e Uso da Terra, ou seja, relacionadas as ações antrópicas, que na área de estudo ainda se mantem em grande parte preservada em função da dificuldade de acesso pelo relevo fortemente acidentado. Sendo que em algumas partes da área estudada, a ocupação antrópica atingiu áreas cujas declividades são moderadas a alta, elevando suscetibilidade ao desastre natural por movimentos de massa.

A CASNA apresentou resultados também parecidos, mas com diferenças significativas em função da diversificação de variáveis envolvidas. Porém devido a diferença entre as escalas dos mapas utilizados no cálculo, comprometeu na qualidade do resultado obtido. Preferencialmente as informações deveriam estar com mesma resolução, mas que infelizmente não foi possível operar para este trabalho. No entanto, se analisado como um todo, as cartas apresentaram semelhanças em função do maior peso que as variáveis morfométricas tem em relação aos demais variáveis envolvidas nos cálculos. E nem pode ser diferente, porque todos os autores consultados apontaram a importância dessas variáveis frente as demais informações utilizadas.

Logo, o método e produtos utilizados foram eficazes para esta análise, que permitirá que órgãos públicos e privados utilizem dessas cartas para auxiliar no planejamento da ordenação territorial e de urbanização em regiões serranas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

(CAPES) pela concessão da bolsa, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará pelo apoio a realização da pesquisa e ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE) pela disponibilidade do espaço, material e equipamentos para pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASL, M. B.; KHALILZADEH, A.; YOUSHANLOUEI, H. R.; MOHAMMAD, M. M. Identifying and ranking the effective factors on selecting Enterprise Resource Planning (ERP) system using the combined Delphi and Shannon Entropy approach. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. v. 41, p. 513-520, 2012.

ÁVILA, C. M. Metodologia Delphi en salud. **Hipertensión y riesgo vascular**. p. 12-16, 2015.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Contribuição: PASSOS, E.; HERRMANN, M. L. de P.; SANTOS, G. F. dos, MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. Florianópolis: Editora da UFSC, v. 3, 2003. p. 877-1436.

CARMO, A. M. do; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R. Análises Quantitativa e Comparativa das Variáveis Morfométricas da Região Serrana da Posição Sul do Maciço Central do Ceará Geradas Através dos MDE: SRTM, Aster GDEM e TopoData. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 67/3, p. 603-620, 2015a.

CARMO, A. M. do; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R.; MESQUITA, A. F. Análise de Risco Ambiental à Erosão Gerada a partir de Produtos de Sensores Remotos: MDE Topodata e Landsat 8. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015, João Pessoa. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa: INPE, p. 5927-5934, 2015b.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 24/08/2015.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: 2ª ed. Edgard Blucher, 1980, 188 p.

CORSEUIL, C. W. **Técnicas de Geoprocessamento e de Análise de Multicritério na Adequação de Uso das Terras**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências

- Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006, p. 117.
- CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p. 337-379.
- DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine init land surface model. **Zeitschrift für Geomorphologie**. p. 60-76. 1968.
- FRANCISCO, C. E. S.; COELHO, R. M.; TORRES, R. B.; ADAMI, S. F. Espacialização de análise multicritério em SIG: prioridades para recuperação de Áreas de Preservação Permanente. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis: INPE, p. 2643-2650, 2007.
- FILHO, O. A.; VIRVILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998, p. 443-269.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidades de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012, p. 158.
- GHOSH, S.; CARRANZA, E. J. M.; VAN WESTEN, C. J.; JETTEN, V. G.; BHATTACHARYA, D. N. Selecting and Weighting Spatial Predictors for Empirical Modeling of Landslide Susceptibility in the Darjeeling Himalayas (India). **Geomorphology**, v. 131(1-2), p. 35–56. 2011.
- GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. dos S. **Geomorfologia Ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006, p. 192.
- GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 159-184.
- HSUEH, S-L. Assessing the Effectiveness of Community-Promoted Environmental Protection Policy by Using a Delphi-fuzzy Method: A case study on solar power and plain afforestation in Taiwan. **Renewable an Sustainable Energy Reviews**. p. 1286-1295, 2015.
- MEIJERING, J. V.; TOBI, H.; BRINK, A. V. D.; MORRIS, F.; BRUNS, D. Explorin research priorities in landscape architecture: An international Delphi study. **Landscape and Urban Planning**. p. 85-94, 2015.
- MOURA, A. C. M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritério. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis: INPE, p. 2899-2906, 2007.
- OZDEMIR, A. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. **Journal of Hydrology**, v. 411, p. 290-308, 2011.
- PORTO, C. G. Intemperismo em regiões tropicais. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p.25-54.
- PRADHAN, B. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. **Advances in Space Research**, v. 45, p. 1244-1256, 2010.
- RITTER, D. F.; KOCHER, R. C.; MILLER, J. R. **Process Geomorphology**. Reissued: 4a ed. Waveland Press, 2006. 548 p.
- SAATY, T. L. **The analytical hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, T. L. Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks. **Pittsburgh: RWS Publications**, 2005.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Services Sciences**. n.1, v.1, p. 83-98, 2008.
- SARTORI, A. A. da C. **Análise Multicritério na Definição de Áreas Prioritárias à Conectividade entre Fragmentos Florestais**. 2010. 112 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)

- Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.
- SILVA, V. C. B.; MACHADO, P. de Sá. SIG na Análise Ambiental: Susceptibilidade Erosiva da Bacia Hidrográfica do Córrego Mutuca, Nova Lima - Minas Gerais. **Revista de Geografia UFPE**, v. 31, p. 66-87, 2014.
- SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da serra do mar paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, p. 03-22, 2014.
- SUGUIO, K. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p. 1.222.
- TRICCO, A. C.; ZARIN, W.; ANTONY, J.; HUTTON, B.; MOHER, D.; SHERIFALI, D.; STRAUS, S. E. An international survey and modified Delphi approach revealed numerous rapid review methods. **Journal of Clinical Epidemiology**. 2015.
- VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata: processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-16702-RPQ/854), p.79, 2010.
- VARGAS, R. V. **Analytical Hierarchy Process, Earned Value and other Project Management Themes**. 2^a. ed., 2015, p. 235. Disponível em <http://rvdownloads.s3.amazonaws.com/uploads/downloads/books/ricardo_vargas_articles_compendium_second-edition.pdf>. Acesso em: 16/10/2015.