

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Desastres Naturais

Os desastres naturais são eventos naturais extremos que têm a capacidade de produzir danos físicos e socioeconômicos durante e após a sua ocorrência. Embora sejam por muitas vezes previstos, eles geralmente ocorrem de forma violenta e rápida, provocando grande destruição (ALCÁNTARA-AYALA, 2002 ; MARCELINO, 2003).

É importante salientar que, associado ao termo desastre natural, estão inclusos o impacto sobre o sistema social, o agente geofísico, o número de mortes e os custos dos danos. Este conjunto de fatores acaba diferenciando o desastre de um evento natural (COPPOK, 1995; MARCELINO, 2003).

De acordo com o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (2011), que baseia-se nos requisitos disponibilizados pelo CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters), para ser caracterizado como desastre, são considerados a ocorrência de pelo menos um dos seguintes critérios:

- 10 ou mais óbitos
- 50 ou mais pessoas afetadas
- Declaração de Situação de Emergência
- Declaração de Estado de Calamidade Pública

Além do mais, o desastre natural pode possuir diferentes níveis de intensidade (Tabela 1). Para Kobayama et al. (2006), a avaliação do grau deste evento é de suma importância, pois facilita o planejamento da resposta e da recuperação da área atingida, visto que as ações e os recursos necessários para o socorro às vítimas dependem da intensidade dos danos e prejuízos gerados.

Tabela 1 - Intensidade dos Desastres Naturais

| NÍVEL | INTENSIDADE | SITUAÇÃO |
|-------|---|--|
| I | Desastres de pequeno porte, também chamados de acidentes, onde os impactos causados são pouco importantes e os prejuízos pouco vultosos. Prejuízo < que 5% PIB municipal | Facilmente superável com os recursos do município. |
| II | De média intensidade, onde os impactos são de alguma importância e os prejuízos são significativos, embora não sejam vultosos. Prejuízo entre 5% e 10% PIB municipal | Superável pelo município, desde que envolva uma mobilização e administração especial. |
| III | De grande intensidade, com danos importantes e prejuízos vultosos. Prejuízos entre 10% e 30% PIB municipal | A situação de normalidade pode ser restabelecida com recursos locais, desde que complementados com recursos estaduais e federais. (Situação de Emergência – SE) |
| IV | De muito grande intensidade, com impactos muito significativos e prejuízos muito vultosos. Prejuízos maiores que 30% PIB municipal | Não é superável pelo município, sem que receba ajuda externa. Eventualmente necessita de ajuda internacional. (Estado de Calamidade Pública – ECP) |

Fonte: Adaptado de KOBAYAMA et al.,2006.

A nível global, tem-se verificado que nas últimas décadas houve um aumento na ocorrência de desastres naturais e nos prejuízos decorrentes de seus impactos. Entre as décadas de 1970 e 2000, segundo dados do EM_DAT (2009), os desastres naturais passaram de 50 registros ao ano para cerca de 350 em 2008, tendo chegado a 500 em 2005. Foi também divulgado que os prejuízos estimados no ano de 1975 eram de aproximadamente 5 bilhões de dólares, chegando a cerca de 180 bilhões em 2008 (TOMINAGA, 2009).

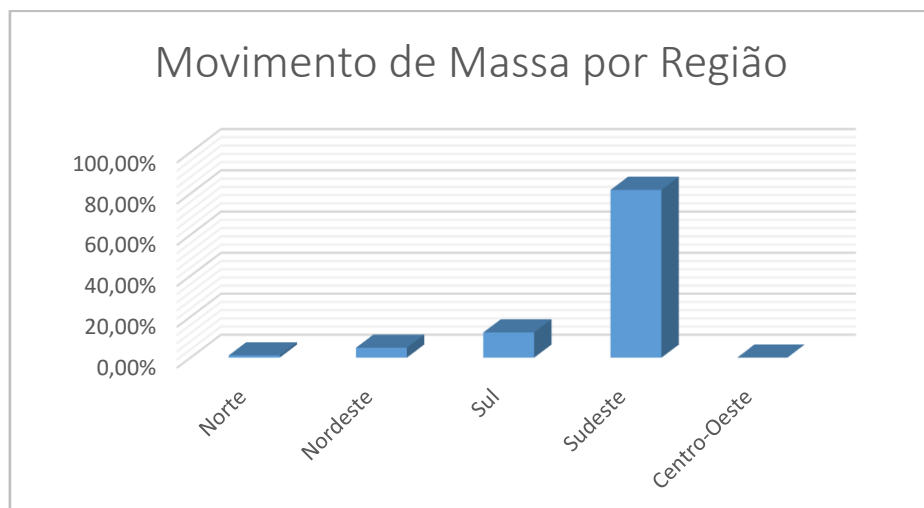
Do mesmo modo, as populações de risco têm apresentado um crescimento anual em torno de 70 a 80 milhões de pessoas, sendo que mais de 90% destas encontram-se nos países em desenvolvimento, ou seja, possuem menores recursos financeiros e maior exposição ao desastre (TOMINAGA, 2009).

No Brasil, os principais fenômenos associados aos desastres naturais são decorrentes da dinâmica externa da Terra, os quais se incluem inundações, enchentes, tempestades e movimentos de massa. Estes últimos, são frequentemente

provocados por chuvas intensas e prolongadas, nos períodos que correspondem ao verão na região sul e sudeste, e ao inverno na região nordeste (TOMINAGA, 2009).

Segundo De Castro et al. (2010), os desastres causados por movimentos de massa têm maior proporção em áreas montanhosas do sudeste e parte do sul do Brasil, especialmente ao longo da Serra do Mar, entre os Estados do Espírito Santo e Santa Catarina (Figura 1). De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2012), cerca de 35% do total de mortes ocasionadas por desastres entre as décadas de 1990 e 2000, foram causadas por movimentos de massa, especialmente na região Sudeste, na qual detinha 90% dos afetados.

Figura 1- Movimentos de massa por regiões do Brasil entre 1990 e 2000



Fonte: ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 2012.

Esse fato pode ser explicado pela associação de sistemas frontais e zonas de convergência - que propiciam acúmulos significativos da precipitação pluviométrica nesta área - juntamente com a ocupação desordenada de encostas, sem qualquer tipo de planejamento. As maiores vítimas são as populações de baixa renda, que por não terem recursos vivem em áreas densamente povoadas e em terrenos de maior suscetibilidade construindo moradias frágeis.

Dessa forma, torna-se imprescindível uma estratégia de redução do risco que seja amparada pelo desenvolvimento social, econômico e ambiental, de maneira que seja levado em conta os perigos existentes e os planos para sua redução (ALCANTARA-AYALA, 2002; UN-ISDR, 2004).

2.2. Suscetibilidade, vulnerabilidade, ameaça, perigo e risco

Diversas definições têm sido atribuídas a alguns conceitos relacionados aos desastres naturais. Termos como a suscetibilidade, vulnerabilidade, ameaça perigo e risco, são utilizados de diferentes maneiras e significados em parte dos trabalhos voltados para o tema.

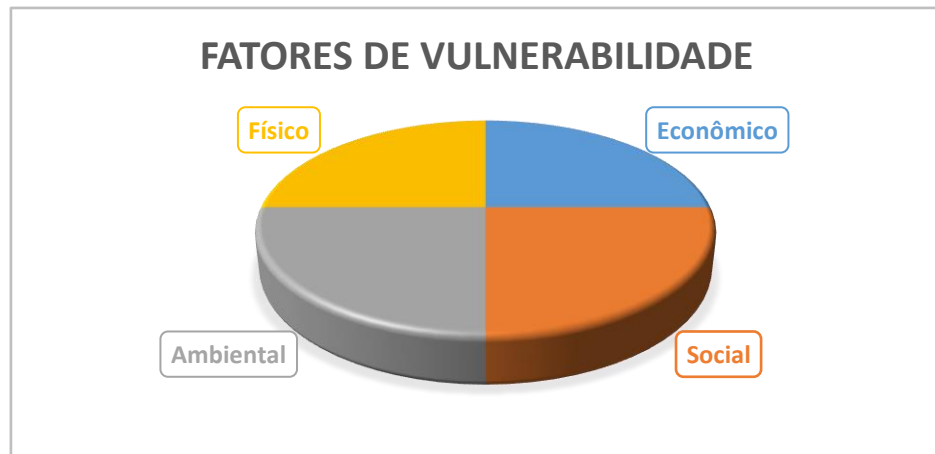
Segundo Bitar (2014), o termo *suscetibilidade* está ligado a predisposição ou propensão dos terrenos ao desenvolvimento de um fenômeno ou um processo do meio físico. Além do mais, pode ser a potencialidade de um evento causar transformações no meio físico, sem levar em conta as consequências para atividades antrópicas.

Tominaga (1998) e Pfaltzgraff (2007), explicitam que a suscetibilidade pode ser classificada em dois tipos: a natural e a induzida. A primeira está relacionada a propriedades geológicas, geomorfológicas e climáticas, por exemplo, (nas quais se incluem as características de declividade, hidrografia, cobertura vegetal, etc), e a segunda, por influência antrópica, como o uso e ocupação do solo.

Dentro deste contexto, é cabível distinguir termos como o de *ameaça*, que, por sua vez, representa o fenômeno ou processo do meio físico do qual a dinâmica possibilita a geração de consequências negativas frente a elementos expostos, como pessoas, infraestrutura e recursos naturais, sem qualquer tipo de previsão (BRESSANI, 2013; BITAR, 2014).

Estas consequências, vão depender do grau de vulnerabilidade destes elementos, que varia entre 0 e 1, e representa a ausência de perdas e danos e a ocorrência destes, respectivamente, sendo medido através de parâmetros referentes a magnitude do evento (JULIÃO, 2009). Do mesmo modo, a *vulnerabilidade* está relacionada ao grau de perda para um dado elemento, grupo, ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo, influenciada diretamente por suas condições sociais, econômicas, físicas e ambientais (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2006; TOMINAGA, 2007) (Figura 2).

Figura 2 - Fatores que influenciam a vulnerabilidade.



Fonte: Adaptado de RODRIGUES, 2013.

Já o termo *perigo*, corresponde a um potencial danoso do evento, fenômeno ou atividade antrópica num dado período de tempo (BITAR, 2014).

Por sua vez, o termo *risco*, é atribuído a uma medida da ameaça e das consequências negativas e seus efeitos em um certo período ou intervalo de tempo (CERRI & AMARAL, 1998; BITAR, 2014). Para a UNDP (2004), o risco representa a probabilidade de ocorrer impactos negativos (mortes, ambiente danificado, atividade econômica interrompida, etc) como um resultado de interações entre um perigo natural e as condições de vulnerabilidade da área (Figura 3).

Figura 3 - Classificação de Risco



Fonte: Adaptado de UN/ISDR, 2004.

Além de expressar a possibilidade de danos físicos, é importante reconhecer que os riscos são inerentes, podem ser criados ou existem dentro de sistemas sociais. Vale considerar que os diferentes contextos sociais em que os riscos ocorrem e as

peças compartilham de uma percepção de risco e suas causas, são heterogêneas (UN/ISDR, 2004).

Neste sentido, os níveis de consciência do risco vão depender da qualidade e quantidade de informações e a percepção social sobre. A maior vulnerabilidade vai estar ligada a pessoas que não estão cientes do perigo que representa uma ameaça a sua vida e bens. A consciência do risco vai variar entre indivíduos, comunidades e governo, de acordo com as suas percepções, diretamente influenciadas pelo conhecimento dos perigos e vulnerabilidade, bem como a disponibilidade de informações precisas e oportunas sobre estes (UN/ISDR, 2004).

Para o presente trabalho, serão sintetizados os conceitos propostos por Bitar (2014), seguindo diferentes referências:

Suscetibilidade: Propensão ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo de uma dada área.

Ameaça: Fenômeno ou processo no qual a dinâmica pode gerar perdas e danos;

Vulnerabilidade: Grau de perdas e danos referentes aos elementos expostos, variando entre 0 e 1; onde o maior grau representa maior vulnerabilidade;

Perigo: Condição potencial de geração de perdas e danos num determinado período de tempo; classificada também como a perigosidade ou periculosidade;

Risco: Medida da ameaça e das consequências que esta poderá causar num dado intervalo de tempo.

2.3. Os Movimentos de Massa

Diversos são os autores que descreveram os movimentos de massa e dentre eles pode-se citar os trabalhos de: Varnes, (1978) Christofolletti (1980); Guidicini & Nieble (1984); Selby, (1982); Fernandes & Amaral, (1996); Press et al. (2006).

De uma maneira geral, os movimentos de massa (landslides) são deslizamentos, fluxos ou quedas declive abaixo de grande quantidade de material rochoso em resposta à atração da gravidade, que contribui para a modelagem da paisagem (SELBY,1982; CASTRO,2006). As massas consistem em substrato

rochoso, material consolidado, incluindo sedimentos compactados e regolitos, ou materiais inconsolidados e não-cimentados (PRESS et al., 2006).

2.3.1. Fatores Condicionantes para a Ocorrência de Movimentos de Massa

Existe uma série de condicionantes naturais do meio físico que influenciam diretamente na sua ocorrência, dentre as quais a geologia, geomorfologia e as variáveis climáticas. Essas condicionantes, associadas ao crescimento e ocupação desordenada das áreas urbanas e à degradação ambiental, principalmente em áreas com grande variação de amplitude topográfica e acentuada declividade, têm levado ao aumento destes eventos nas encostas dos morros (RIFFEL & GUASSELLI, 2012).

Guicini e Nieble (1984), propõem a classificação destes fatores como predisponentes e efetivos. Os primeiros estariam relacionados ao conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais que contribuiriam para a ocorrência de movimentos, tais como a formação geológica, hidrológica e vegetal. Os segundos, seriam os fatores diretamente responsáveis pelo desencadeamento de movimentos de massa, tais como, ações antrópicas, erosões eólicas e chuvas intensas.

Em ambientes tropicais úmidos, como o sudeste brasileiro, as chuvas intensas de curta e longa duração podem propiciar a diminuição da resistência do solo, atuando como um dos principais agentes deflagradores de movimentos de encostas (GUICINI & IWASA, 1976).

Guerra et al. (2007; 2013), realizaram estudos no município de Petrópolis/RJ, e constataram que as causas principais para a ocorrência de movimentos de massa de grande magnitude foram geradas pela pluviosidade, concentrada especialmente nos meses de verão, aliada à existência de encostas de alta declividade.

De acordo com Selby, (1993) e Castro (2006), a força da gravidade pode gerar tensões cisalhantes no interior do manto de alteração ao longo das vertentes, podendo ser agravadas pela inclinação e altura das encostas, o peso do material e o conteúdo de água que o contém.

Da mesma maneira, Cunha e Guerra (1996), associam a ocorrência deste fenômeno em função da forma da vertente. Para os autores, a morfologia da encosta,

principalmente as porções côncavas, exercem influência na geração de zonas de convergência e divergência dos fluxos d'água superficial, subsuperficial e de sedimentos, sendo estas zonas preferenciais para a geração de deslizamentos.

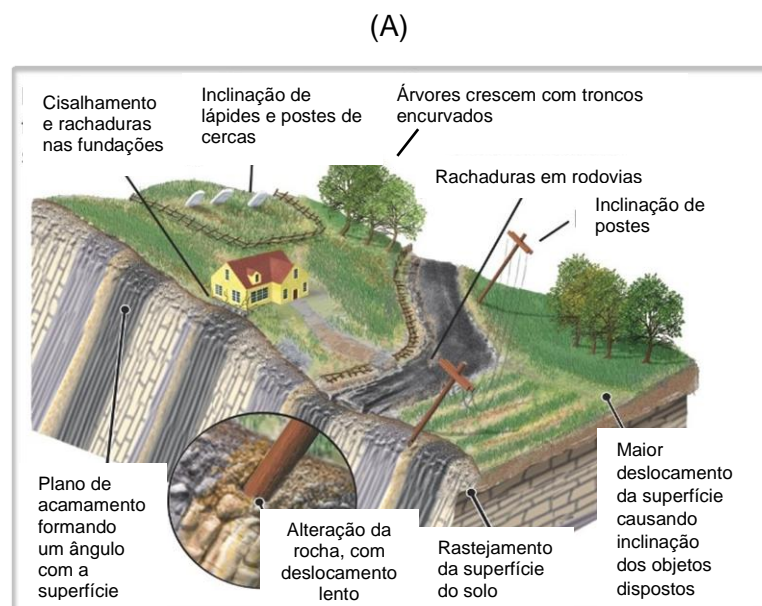
Para Trudghill (1988), em grande parte das vezes o processo se inicia com a retirada de cobertura vegetal, embora o autor também admita que áreas florestadas podem ser afetadas pelos movimentos de massa. Ele sugere que a suscetibilidade das encostas vai depender não apenas dos solos e vegetação como também de suas declividades, formas e tipo de intervenção antrópica.

2.3.2. Classificação

No Brasil, segundo a proposta de Augusto Filho (1994); Oliveira et al. (1998); Bitar (2014), os principais movimentos de massa, são os rastejos, escorregamentos, corridas de massa e queda de blocos, explicados resumidamente abaixo:

- Rastejo (talus-creep, soil-creep, rock-creep) – apresenta-se como o movimento mais lento do regolito. Sua velocidade geralmente é imperceptível, sendo maior na superfície e diminuindo gradualmente até zero com a profundidade (Figura 4).

Figura 4 - Movimento de Rastejo



(B)



Legenda: (A) Ilustração do processo; (B) Local afetado pelo movimento.
Fonte: SILVA, 2012.

- Escorregamentos/Deslizamentos (slides) – são gerados pela falta de instabilidade das encostas e a existência de superfícies de deslizamento. Essas condições possibilitam movimentos rápidos e de curta duração com velocidades de metros por hora a metros por segundo. Fernandes e Amaral (1996), os descrevem como sendo de dois tipos: Translacionais e Rotacionais (Figura 5).

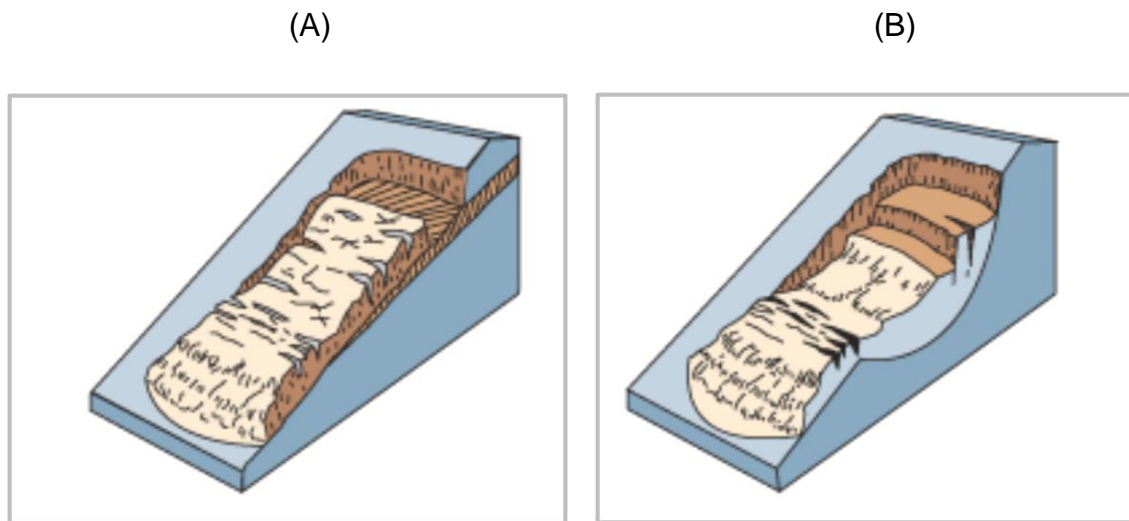
a) Translacionais:

São a forma mais frequente de movimentos de massa e apresentam ruptura na forma planar, acompanhando descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas de dentro do material;

b) Rotacionais:

Representam uma superfície de ruptura côncava e curva, sendo comuns em encostas compostas por materiais de alteração que têm sua origem em argilitos e folhelhos.

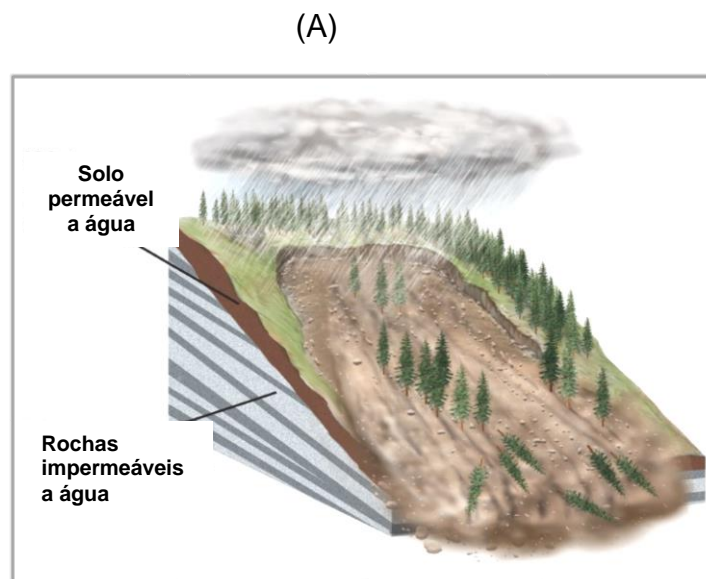
Figura 5 - Tipos de Escorregamentos



Legenda: (A) Translacionais e (B) Rotacionais.
Fonte: USGS, 2004.

- Corridas de Massa (earth-flow, mud-flow) – caracterizam-se pela presença de superfície impermeável no solo e/ou regolito, que se saturada de água, pode se comportar como um fluido altamente viscoso que poderá deslocar-se rapidamente em velocidades de até metros por segundo, ao longo das linhas de drenagem (Figura 6).

Figura 6 - Corridas de lama



(B)

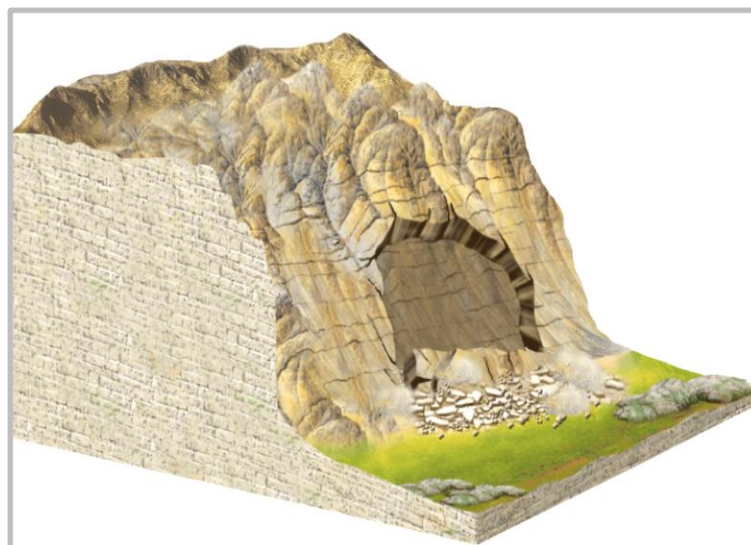


Legenda: (A) Ilustração do processo; (B) Ocorrência em área da Região Serrana em 2011.
Fonte: Adaptado de SILVA, 2012; MMA, 2011.

- Quedas (rock fall, debri-fall) – São movimentos de blocos e fragmentos rochosos oriundos de afloramentos verticais, por meio de queda livre, salto ou rolamento, sem a presença de uma superfície de deslizamento. Possuem alta velocidade, na ordem de m/s (Figura 7).

Figura 7 - Quedas de blocos

(A)



(B)



Legenda: (A) Ilustração do Processo; (B) Quedas de blocos ocorrida em uma localidade de Portugal.
Fonte: SILVA, 2012.

Vale salientar que Varnes (1978), estabeleceu uma escala quantitativa de movimentos de massa, com o objetivo de descrever a velocidade destes processos e facilitar a sua classificação. Posteriormente, ela foi modificada por Cruden e Varnes (1996), sendo apresentada abaixo (Tabela 2):

Tabela 2 - Escala de Movimentos, segundo Cruden e Varnes (1996)

| Classe de Velocidade | Escala de Movimento | Velocidade (mm/seg.) | Velocidade média |
|----------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| 7 | Extremamente rápido | 5×10^3 | 5m/s |
| 6 | Muito rápido | 5×10 | 3m/min |
| 5 | Rápido | 5×10^1 | 1,8m/h |
| 4 | Moderado | 5×10^3 | 13m/mês |
| 3 | Lento | 5×10^{-5} | 1,6m/ano |
| 2 | Muito lento | 5×10^{-7} | 16 mm/ano |
| 1 | Extremamente lento | | |

Fonte: Adaptado de Queiroz, 2011.

2.4 Mapeamento e Previsão de Movimentos de Massa

Com o aumento do número de registros de ocorrências de desastres naturais, tais como os gerados pelos movimentos de massa nestes últimos anos, têm sido observados, o aprimoramento de técnicas que facilitam a investigação e documentação destes eventos. Segundo Guzzetti et al. (1999), a necessidade de informações acerca da instabilidade de encostas torna-se um meio para os planejadores e órgãos competentes de prevenir e/ou amenizar os impactos ocasionados por este fenômeno.

Fernandes e Amaral (1996), destacam que a documentação e a investigação de deslizamentos são etapas fundamentais para a definição da modelagem do processo, sendo a única forma de aplicar soluções adequadas para a redução de suas consequências.

Neste sentido, o mapeamento é considerado uma importante ferramenta que fornece subsídios para auxiliar na identificação dos fatores e processos envolvidos na instabilidade de terrenos e, associada a um SIG, pode prever o comportamento geomecânico dos solos, através da distribuição espacial dos movimentos de massa.

2.4.1 Mapas de Inventário

Representam uma abordagem mais simples da distribuição espacial dos movimentos de massa, incluindo informações como tipo, tamanho, forma e estado de atividade. Este mapa geralmente consiste em um conjunto de informações obtidas por meio de fotografias aéreas, imagens de satélite serviços de campo, onde são identificadas algumas cicatrizes de deslizamentos na área de investigação (MARCELINO, 2003; VANACÔR, 2006).

Segundo Marcelino (2003), o mapa de inventário acaba sendo uma base para futuros mapas, tais como os de risco e o de suscetibilidade, pois os dados de deslizamentos registrados podem indicar novas ocorrências de eventos, já que as condições de terreno geralmente são as mesmas de antes.

2.4.2 Mapas de Suscetibilidade

Fernandes e Amaral (1996), consideram que os mapas de suscetibilidade são úteis para fornecer informações acerca da probabilidade espaço-temporal, tipos, magnitudes e velocidade de avanço dos movimentos de massa.

Diversas são as abordagens conceituais, técnicas e metodológicas encontradas na literatura que foram desenvolvidas para este tipo de mapeamento, como as apresentadas por Fernandes e Amaral (1996); Soeters e Van Westen (1996); Guzzeti et al. (1999); Marcelino (2003); Süzen e Doyuran (2004); Pfaltzgraff (2007); Rodrigues (2013).

De todo modo, elas baseiam-se, de acordo com Clerici et al. (2002), a uma série de etapas que envolvem desde a obtenção de um inventário de movimentos de massa, a uma correlação entre os fatores geoambientais selecionados como possíveis de influenciar a ocorrência destes eventos, e este inventário, gerando como produto, um mapa final contendo diferentes graus de suscetibilidade.

2.4.3 Mapas de Risco

O mapa de risco fornece informações acerca da probabilidade temporal e espacial, tipologia e comportamento do evento, além da vulnerabilidade dos elementos expostos (DAI, LEE & NGAI, 2002). Dessa forma é avaliado o potencial de danos, incorporando fatores externos (LESHCHINSKY, OLSEN & TANYU, 2015).

Para Fernandes e Amaral (1996), a metodologia aplicada na preparação dos mapas de risco envolverá a identificação e análise do risco, por meio de três fases:

- a) Levantamento de dados: Coleta de dados referentes a características físicas e de uso do solo e cadastro de deslizamentos pretéritos;
- b) Mapeamento de Campo: Investigação em campo de informações obtidas pelo levantamento de dados, onde são reconhecidos materiais geológicos e contactados os moradores das áreas de análise, como forma de melhorar a operacionalização dos trabalhos de campo.

Posteriormente, após a preparação do mapa, são definidas as escalas de trabalho para o gerenciamento de risco;

- c) Representação Cartográfica: Produção de relatórios técnicos bem ilustrados, informatização dos produtos finais em um banco de dados e apresentação dos resultados em sessão pública para conhecimento da população, principalmente aquelas que habitam áreas de risco.

Embora apresente grande importância para o gerenciamento do risco, este tipo de mapeamento possui uma aplicabilidade temporal limitada, visto que a vulnerabilidade dos elementos e suas classificações associadas apresentam caráter fortemente dinâmico, principalmente em áreas em que o uso e ocupação do solo encontram-se sob maior pressão (MARCELINO, 2003).

2.5 Modelos Matemáticos

Em decorrência da natureza complexa dos movimentos de massa, por muitas vezes torna-se difícil a previsão exata da suscetibilidade no processo de mecanismo de ruptura e do volume que tende a ser deslocado nestes eventos. Porém, se for levado em consideração algumas suposições analíticas e condições do terreno, modelos matemáticos teóricos adequados podem ser aplicados para este tipo de análise (OLIVEIRA DIAS, 2006). Segundo Fernandes et al., (2001), o uso de modelos matemáticos voltados a previsão de áreas suscetíveis a movimentos de massa vai depender, diretamente, de uma ampla compreensão dos diversos mecanismos e fatores que atuam nestes processos, necessitando monitoramento e ensaios de campo.

De uma forma geral, os procedimentos matemáticos mais utilizados no mapeamento da suscetibilidade se baseiam em três modelos distintos, categorizados como heurístico; determinístico e estatístico (FERNANDES & AMARAL, 1996; SOETERS & VAN WESTEN 1996; GUZZETI et al., 1999; MARCELINO, 2003), brevemente descritos a seguir.

2.5.1 Modelo Heurístico

Segundo Soeters e Van Westen (1996), o método heurístico usa o levantamento da suscetibilidade para classificar o risco, através da combinação entre o mapeamento de movimentos de massa e a configuração geomorfológica da área de estudo. Para isso podem ser utilizados dois tipos de análise: a análise geomorfológica e a geração de um mapa qualitativo.

Porém, a elaboração de um mapa geomorfológico e a determinação de atributos, tais como o peso das classes e parâmetros, apresenta grande subjetividade, afetando a confiabilidade do mapa final.

2.5.2 Modelo Determinístico

Este método se baseia no uso de modelos hidrológicos e de estabilidade, tais como o Shalstab e o Sinmap (FERNANDES et al., 2001; DOURADO, 2006), que levam em consideração informações detalhadas de encostas no princípio de mecânica dos solos, obtidos em grande parte por análises de campo e laboratório (MARCELINO, 2003). Além do mais, ele trabalha com a quantificação dos graus de risco em valores absolutos, de forma que seja minimizada a subjetividade nos resultados do mapa gerado.

2.5.3 Modelo Estatístico

De acordo com Soeters e Van Westen (1996), o método estatístico de suscetibilidade a movimentos de massa tem como base a análise estatística das combinações de fatores que geraram estes eventos no passado, e a previsão quantitativa, feita para áreas que não tiveram, mas possuem condições semelhantes a estes locais de ocorrência.

Fernandes et al. (2001), explicita que estes procedimentos foram criados tendo em vista uma menor subjetividade e melhor difusão no mapeamento da suscetibilidade. Neste sentido, eles são mais objetivos, possuem maior rigor formal e

melhor adequação para análises de probabilidade, principalmente em médias escalas (CLERICI et al., 2006).

Para serem efetuadas as análises de suscetibilidade, duas metodologias estatísticas podem ser utilizadas: a bivariada e a multivariada (SOETERS & VAN WESTEN, 1996; VANACÔR & ROLIM, 2012).

Embora as duas utilizem a frequência ou densidade de deslizamentos por classe para a determinação dos pesos, elas apresentam algumas diferenças. A estatística bivariada considera o peso de cada classe e de cada parâmetro de análise utilizando técnicas de inferência espacial. Já a multivariada, considera para cada unidade amostral (polígono ou pixel) a presença ou ausência de deslizamento, gerando uma matriz de dados que é exportada e analisada em um pacote estatístico (SOETERS & VAN WESTEN, 1996).

2.5.3.1 A Estatística Bivariada

A utilização do método estatístico bivariado, origina um mapa no qual cada fator (ex. geologia, declividade, uso do solo, etc.), é combinado com o mapa de distribuição de deslizamentos, e o peso dos valores atribuídos é baseado no relacionamento entre a densidade ou frequência destes eventos (calculados para cada classe de parâmetros), com a densidade de deslizamento ao longo de toda a área (BONHAM-CARTER, 1994; SOETERS & VAN WESTEN, 1996; SUZEN & DOYURAN, 2004; PRADHAN, 2010; ADHIKARI, 2011; BIJUKCHHEN, KAYASTHA & DHITAL, 2013).

Neste sentido, diferentes metodologias podem ser utilizadas, dentre as quais, podem ser citadas o método do Valor Informativo (YIN & YAN, 1988; WANG & SASSA, 2005; QUEIROZ, 2011), Pesos de Evidência (MAGALHÃES & FILHO, 2009; SCHICKER & MOON, 2012) a *NSF (Nominal Susceptibility Fator)*, (ADHIKARI, 2011) e as tabulações cruzadas (SOETERS & VAN WESTEN, 1996).

Cada método tem suas regras específicas para a integração de dados necessárias para produzir o mapa de suscetibilidade final. Para Soeters e Van Westen (1996), o peso dos valores pode ser utilizado para designar regras de tomadas de decisão, através de um conhecimento prévio, baseado na experiência de um geocientista. Da mesma forma eles ressaltam que o uso do SIG é uma importante

ferramenta de auxílio para o desenvolvimento da metodologia adotada, principalmente quando se utiliza de um grande número de combinações de mapas.

Neste sentido, os seguintes procedimentos devem ser utilizados:

- a) A classificação de cada mapa de fatores em um número de classes relevantes;
- b) Combinação dos mapas de fatores selecionado com o mapa de movimentos de massa, gerando tabulações cruzadas que definem as correlações espaciais entre eles;
- c) Atribuição de valores de ponderação para os diferentes mapas de fatores ou regras de decisão a ser aplicada aos mapas, que resultará na classificação de risco e posteriormente no mapa de suscetibilidade final.

Vanacôr e Rolim (2012) aplicaram a estatística bivariada para mapear a suscetibilidade a deslizamentos na região Nordeste do Rio Grande do Sul. Eles ressaltam que o uso do sensoriamento remoto e do SIG foram muito importantes durante as etapas até o produto final, pois facilitaram o processo de elaboração de mapas temáticos e de suscetibilidade.

Santos (2011), aplicou a estatística bivariada, por meio do Método do Valor Informativo (Yin & Yan, 1988) para avaliar a suscetibilidade de movimentos de massa em falésias da região de Algarves em Portugal e obteve resultado satisfatório, indicando que o trabalho desenvolvido pode ser útil na avaliação de ocorrência de instabilidades.

Queiroz (2012), utilizou a mesma metodologia para desenvolver um modelo de avaliação da suscetibilidade de falésias na região costeira do Concelho de Mafra em Portugal. Foi demonstrado a possibilidade de conhecimento dos fatores mais relevantes na ocorrência de movimentos de massa, resultando em dados confiáveis e eficientes. Porém, ela destaca que a aquisição de um inventário multitemporal de ocorrência destes eventos, associado a uma base de dados cartográfica, foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

Seguindo a proposta por Soeters e Van Westen (1996), foi aplicado no presente estudo a estatística bivariada a partir de tabulações cruzadas, dos quais foram atribuídos pesos a cada plano de informação, gerando como produto final um mapa de suscetibilidade.

2.6 O Sensoriamento Remoto e o SIG na análise da suscetibilidade

O processamento digital de imagens de satélite e tecnologias de SIG são ferramentas que podem auxiliar o estudo de movimentos no solo e sua evolução espaço-temporal. Estes instrumentos ganham importância por suas capacidades de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o ambiente, através do processo de registro, medição e interpretação, em escala local, regional e global, com expressiva periodicidade e eficiência.

Para Bispo et al., (2009) as tecnologias de SIG são de suma importância neste estudo, pois permitem a integração de informações diversas, tais como topografia, dados de pedologia, litologia, entre outros, auxiliando na elaboração de prognósticos mais completos e confiáveis na área de interesse.

Sbroglia, e Higashi (2013), afirma que a utilização do SIG, aliado ao estudo geotécnico, permite várias aplicações como a elaboração de mapas temáticos, cartografia geotécnica e modelagem numérica de terreno (MDT), atuando na caracterização do meio físico como forma de prever o comportamento geomecânico dos solos e assim, a distribuição espacial dos movimentos de massa.

Tofani et al. (2013), explicita que o sensoriamento remoto pode ser considerado como um instrumento satisfatório para o mapeamento de deslizamentos de terra e monitoramento de risco, pois ele fornece uma ampla disponibilidade de técnicas e dados de origem que podem ser utilizados de acordo com o tamanho e velocidade dos fenômenos pesquisados.

2.6.1 Modelo Digital de Elevação

Segundo Valeriano (2008), o modelo digital de elevação é uma representação matemática da distribuição de um determinado fenômeno na região da superfície terrestre por meio computacional. Ele contém registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas como uma imagem de um determinado valor de elevação em cada pixel, correspondendo a valores de altitudes do relevo em questão.

Sua construção por meio de mapas topográficos se dará através da digitalização de isolinhas e, posteriormente, a uma interpolação na qual as altitudes vão estar estimadas ponto a ponto de uma grade regular para o seu armazenamento (VALERIANO, 2008).

Dentro deste contexto, incluem-se os dados refinados do SRTM, oriundos de processos interferométricos de radares de abertura sintética (SAR), desenvolvidos pela NASA, que cobrem todo o globo terrestre. Para o continente sul-americano, o SRTM apresenta resolução horizontal de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 m) e resolução vertical de 1 m, sendo planejado para suprir mapeamentos em escalas entre 1:50.000 e 1: 250.000 (VANACÔR, 2006).

O uso dos MDE's acaba tornando-se fundamental no estudo da morfometria do relevo pois, embora apresente representação simplificada (modelo) da realidade concreta, ele tem grande importância para diversos estudos na dinâmica da superfície terrestre, tais como os envolvidos em hidrologia superficial, inundações e processos relacionados a movimentos de massa (VALERIANO, 2008).

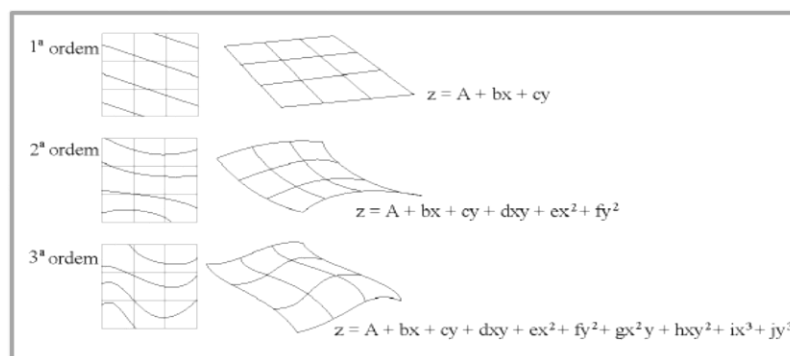
Na literatura, são frequentes os trabalhos referentes aos movimentos de massa tendo como apoio o uso do MDE. Stahke (2010), por exemplo, aplicou dados de SRTM para analisar a suscetibilidade a deslizamentos das áreas no entorno do gasoduto Bolívia-Brasil, localizado no Rio Grande do Sul. Já Castellanos (2005), utilizou os dados fornecidos pelo SRTM para verificar a geomorfometria de um terreno e sua suscetibilidade a escorregamentos em uma área de um arquipélago cubano, através de mapas gerados pelo MDE.

2.6.1.1 As Derivadas Geomorfométricas Locais

As derivações geomorfométricas locais são o resultado de operações geradas pelo MDE para obter novas informações da mesma estrutura, denominada raster. Esta, se apresenta como uma matriz, composta por linhas e colunas georreferenciadas, representando em cada pixel o valor referente a um atributo, ou seja, uma área do terreno definida de acordo com a sua resolução espacial.

O processo para a obtenção desses produtos se dá através da altimetria, com derivações em torno de cada ponto analisado operado através de janelas móveis (Figura 8) (VALERIANO, 2010).

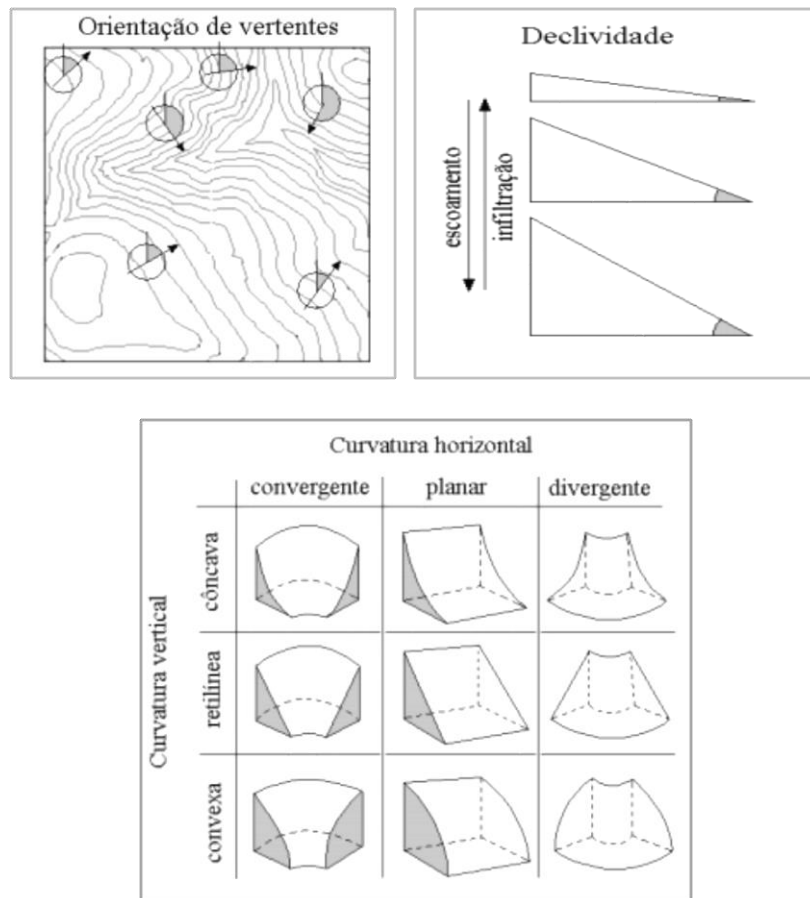
Figura 8 - Polinômios de 1ª, 2ª e 3ª ordem ajustados a um segmento de superfície.



Fonte: Adaptado de VALERIANO, 2010.

Além da própria altimetria, (que deriva de ordem zero), são fornecidas a declividade e a orientação de vertentes (derivadas de 1ª ordem) e as curvaturas vertical e horizontal (derivadas de 2ª ordem), estas últimas que combinadas, correspondem a forma do terreno (Figura 9).

Figura 9 - Variáveis geomorfológicas locais.



Fonte: Adaptado de VALERIANO, 2008.

2.6.2 A utilização de Sensores Remotos para a identificação de cicatrizes de deslizamento

Segundo Sestini (2000) as transformações do uso e cobertura do solo, em suas camadas superficiais tanto por processos naturais quanto antrópicos resultam em mudanças nas características espectrais da superfície, que podem ser detectadas pelos sensores. Da mesma forma, as características de resolução espacial, temporal, radiométrica e espectrais, associadas ao caráter sinóptico dos dados obtidos, possibilitam a observação de feições e mudanças da paisagem atribuídas aos processos de movimentos de massa, fornecendo informações acerca das causas e consequências deste evento, além de avaliar riscos e tomada de decisões (JOYCE et al., 2009; MARINHO et al., 2011)

A aplicação de imagens orbitais para esta finalidade tem sido amplamente utilizada por meio de diversas técnicas e abordagens. Neste sentido, estão disponibilizadas atualmente, diferentes sistemas de imageamento orbitais, tais como os sensores passivos (ópticos), e os ativos como o LIDAR e o radar de abertura sintética (SAR- *Synthetic Aperture Radar*).

No caso de sensores ópticos, embora as condições meteorológicas influenciem diretamente na qualidade das imagens, eles são muito utilizados como um importante instrumento de análise da superfície terrestre. Leques de detritos formados pela deposição de materiais e cicatrizes geradas pela retirada de cobertura vegetal do solo, por exemplo, podem ser registrados, sendo este último expresso pela seguinte relação (SESTINI, 2000; GUIMARÃES et al., 2008; RODRIGUES, 2013):

$$N = f(RA)$$

(2.1)

Onde:

N = número de cicatrizes possíveis de serem identificadas

R = resolução espacial do sensor

A = área das cicatrizes

f = função direta

Quanto aos sensores ativos, suas principais vantagens estão relacionadas a grande capacidade de operacionalização. Por não sofrer grande influência de agentes atmosféricos e funcionar em qualquer período do dia, possibilita uma qualidade satisfatória nas imagens adquiridas, além de uma maior periodicidade na aquisição de dados. Em regiões tropicais, que possuem um regime de chuvas intenso, o uso de sensores ativos, torna-se uma importante ferramenta de monitoramento e análise de movimentos de massa, especialmente no Brasil, visto que estas são as áreas mais afetadas por estes fenômenos.

Inúmeros trabalhos já foram desenvolvidos com o objetivo de identificar cicatrizes de movimentos de massa a partir do uso de sensores remotos ativos. Yamaguchi e Kimura, (2000), por exemplo, utilizaram o SAR do satélite JERS-1, para detectar deslizamentos de terra, e explicitaram que podem ser identificados também,

deslizamentos anteriormente desconhecidos. Da mesma forma, Massonet & Feigl (1998), usaram o Radar SAR para analisar um deslizamento ocorrido nos Alpes Franceses, no qual foi colhido informações de um ciclo orbital de 3 dias.

Além do mais, Leshchinsky et al. (2014), trabalharam com dados provenientes do LIDAR em diferentes localidades dos Estados Unidos, como forma de testar o uso da ferramenta CCM (Contour Connection Method), que aplica nós e contornos no mapa, para detectar deslizamentos e avaliar suas características, e obtiveram êxito no trabalho final, demonstrando ser um instrumento que apresenta vários benefícios e contribuições na identificação de movimentos de massa e aplicabilidade em diferentes paisagens.

2.6.3 A Análise Multicritério

Dentro do ambiente SIG, algumas técnicas são comumente utilizadas para analisar e descrever as diferentes combinações de dados espaciais. Dentre as mais conhecidas, está a inferência espacial, que permite a integração destes dados em diversos formatos e fontes com o objetivo de modelar empiricamente determinado fenômeno, tais como os provenientes de processos ambientais, por meio da análise multicritério (BISPO, 2009).

De acordo com Bonham-Carter (1994) e Câmara et al. (2001) os modelos derivados deste processo são uma combinação de um conjunto de dados (mapas), onde através de uma função f , produzem um novo dado de saída. Como resultado final, serão gerados planos de informações com diferentes representações temáticas e numéricas:

$$\text{Saída} = f(\text{dados de entrada}) \quad (2.2)$$

A análise multicritério como ferramenta do SIG, é capaz de ordenar e apresentar informações especializadas e suas relações internas com o meio, sendo muito adequada para o emprego das geotecnologias na criação de síntese de variáveis, com o objetivo de identificar áreas prioritárias para algum fenômeno ou arranjo geográfico (MOURA, 2007). Ela pode ser baseada na aplicação de funções de pertinência de conjuntos tais como o fuzzy, média ponderada e do método do processo analítico hierárquico - Analytical Hierarch Process (AHP) (BARIN et al., 2010), que auxiliam no processo de tomada de decisão, e são apresentados a seguir.

2.6.3.1 Média Ponderada

É uma técnica que consiste na ponderação das classes de cada plano de informação de acordo com pesos definidos empiricamente, ou seja, dependendo do seu grau de importância para a hipótese em consideração, através de um mapa de entrada (BONHAM-CARTER, 1994; MUÑOZ, 2005; CÂMARA et al., 2001). O resultado será um mapa com áreas que expressam um grau de importância relativa através dos valores numéricos de saída. Segundo Muñoz (2005), há dois tipos de modelos:

- a. Evidência Binária – Cada mapa é multiplicado por seu fator de peso, somado com todas as variáveis e normalizado pela soma dos pesos. É expresso pela seguinte equação:

$$S = \frac{\sum_i^n W_i \text{Class}(MAP_i)}{\sum_i^n W_i}$$

(2.3)

Onde W_i = Peso do i -ésimo mapa; $(MAP_i) = 1$, se é presença ou 0, se é ausência da condição binária; S = Valoração de saída, que estará entre 0 (extrema desfavorabilidade) e 1 (altíssima favorabilidade).

b. Evidência *Multiclass* – São atribuídas pontuações para cada classe que ocorre dentro de cada mapa de evidência, as quais devem ser definidas em uma tabela de atributos relacionada a cada um.

$$\bar{S} = \frac{\sum_i^n S_{ij} W_i}{\sum_i^n W_i}$$

(2.4)

Onde \bar{S} é o peso (ou valoração) para uma área – objeto (polígono, pixel), W_i é o peso do i – ésimo mapa de evidência e S_{ij} é a valoração da j -ésima classe do i -ésimo mapa.

As tabelas de valoração e o mapa de pesos são ajustados segundo o julgamento do especialista.

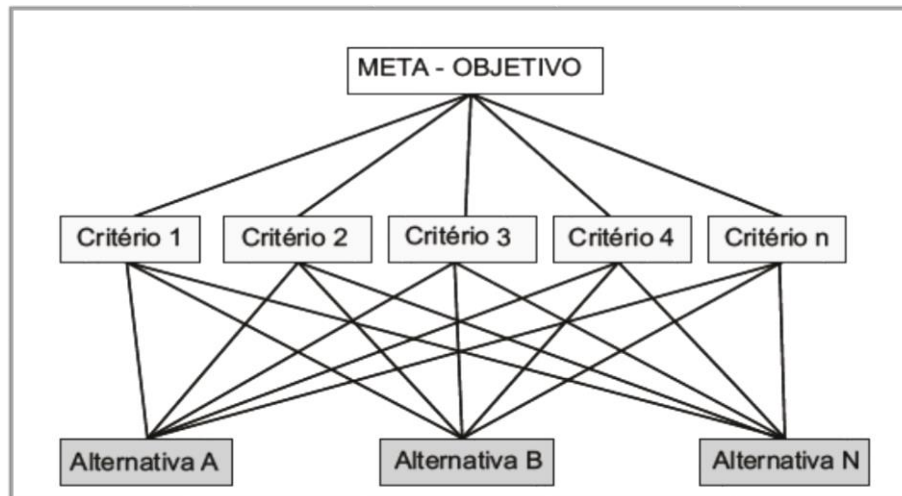
2.6.3.2 AHP- Processo Analítico Hierárquico

Segundo Câmara et al. (2001), as diversas técnicas de análise espacial num sistema de informação geográfica têm como finalidade a produção de diferentes hipóteses sobre o tema de estudo. Esta variedade, porém, pode representar uma dificuldade na escolha de um modelo mais adequado de combinação dos dados e na geração dos cenários que irão servir de base para os processos de tomada de decisão.

Como alternativa para a minimização dos problemas acima mencionados, pode ser aplicado o método do Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido por Saaty (1978) no qual busca-se estabelecer e organizar um modelo mais racional de integração de dados (MOREIRA, 2002; SAATY, 2008).

Além do mais, esta técnica pode fornecer um procedimento mais compreensivo de suporte a decisão, de forma que sejam representadas e quantificadas as variáveis envolvidas em uma hierarquia de critérios ponderados por pesos (Figura 10).

Figura 10 - Decomposição de um problema em uma hierarquia



Fonte: Adaptado de FARIA & AUGUSTO FILHO, 2013.

Para Saaty (1994), um ponto a favor a sua utilização está relacionado a sua capacidade em lidar tanto com aspectos qualitativos quanto quantitativos na tomada de decisão, visto que os valores dos julgamentos das comparações pareadas serão baseados em experiência e intuição.

Diferentes autores já fizeram uso desta técnica. Komac (2006), aplicou o método AHP no mapeamento de suscetibilidade de escorregamentos em uma região Central da Slovênia e obteve êxito no resultado final. Zare et al. (2014), utilizaram a mesma metodologia para estudar a suscetibilidade a movimentos de massa no norte do Irã associada a uma análise estatística, e tiveram como produto uma maior acurácia frente a outros métodos.

De acordo com Saaty (1980), a técnica AHP se inicia com a decomposição do problema em níveis hierárquicos e, posteriormente, os avaliadores analisam sistematicamente as alternativas por comparação pareada em cada um dos critérios definidos (FARIA & AUGUSTO FILHO, 2013).

Quando as comparações e os pesos são estabelecidos, é determinada a razão de consistência dos julgamentos, medindo a coerência dos pesos que foram atribuídos a cada par de critérios. Depois desta etapa, é calculada a valoração global para cada critério, medindo a coerência dos pesos atribuídos a cada um destes pares.

Por fim, após esta análise, calcula-se a valoração global para cada critério, a partir da multiplicação de cada prioridade do primeiro nível, por sua respectiva de

segundo nível, indicando a posição relativa de cada critério na classificação final (SAATY, 1980; 1997; FARIA & AUGUSTO FILHO, 2013).

A seguir será descrito mais detalhadamente as etapas do processo AHP, baseados nos trabalhos de Saaty (1990) e Faria e Augusto Filho (2013).

1- Atribuição de Pesos

Baseados em uma escala onde será medido a consistência dos julgamentos, a partir da comparação dois-a-dois (Tabela 3), com valores de 1 a 9, os números ímpares serão mais comumente utilizados, e os pares, quando não houver um consenso natural entre os avaliadores (CÂMARA et al., 2001).

Tabela 3 - Comparação pareada proposta por Saaty (1978)

| IMPORTÂNCIA | DEFINIÇÃO E EXPLICAÇÃO |
|-------------|--|
| 1 | Importância Igual – Os dois valores contribuem igualmente para um objetivo |
| 3 | Importância Moderada – Um fator é ligeiramente mais importante do que o outro |
| 5 | Importância Essencial – Um fator é claramente mais importante do que o outro |
| 7 | Importância Demonstrada - Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática |
| 9 | Importância extrema - A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível |
| 2,4,6,8 | Valores intermediários entre julgamentos - possibilidade de compromissos adicionais |

Fonte: CÂMARA et al., 2001.

2 – Cálculo da Matriz de Comparação de prioridades

Através da escala, é construído uma matriz comparativa, de forma que o critério 1 tenha preferência sobre o critério 2 e a diagonal da matriz seja representada pela unidade (Tabela 4).

Tabela 4 - Matriz de Comparação pareada

| | CRITÉRIO 1 | CRITÉRIO 2 |
|------------|----------------------|--------------------|
| CRITÉRIO 1 | 1 | Avaliação numérica |
| CRITÉRIO 2 | 1/Avaliação numérica | 1 |

Fonte: Adaptado de SAATY, 1978.

3 – Análise da consistência de julgamentos

Nesta etapa, a consistência, a integridade, a quantidade e a coerência dos julgamentos serão avaliadas através da utilização do cálculo do auto valor, ou seja, se estão relacionados em modo lógico. Neste sentido, esse cálculo, conhecido também como análise de sensibilidade será apresentado abaixo:

$$\lambda_{\text{máx}} = T \cdot w$$

(2.5)

Onde,

T= autovetor normalizado;

W= soma das colunas da matriz de comparações p/ cada critério

4- Valoração Global

É finalmente realizada a valoração global de cada uma das alternativas segundo o método da soma ponderada, expressa pela equação:

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j v_j$$

(2.6)

Com $\sum_{j=1}^n p_j = 1$

$0 < p_j < 1$ ($j= 1, \dots, n$)

onde: $V(a)$ corresponde ao valor global da alternativa analisada; p_j , importância relativa do critério j ; v_j , nível de preferência da alternativa analisada no critério j .

De acordo com Faria e Augusto Filho (2013), este método pode ser aplicado de forma homogênea em diferentes cenários de perigo. Obtendo um modelo considerado estável, pequenas alterações na atribuição de pesos não irão afetar muito os resultados. Executando-se todas as etapas relatadas, será permitido a coleta de informações consistentes para tomada de decisão em problemas complexos.

A técnica AHP, foi utilizada no presente trabalho, e será melhor explicitada nos capítulos referentes a metodologia e aos resultados, respectivamente.