

APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP) NO MAPEAMENTO DE PERIGO DE ESCORREGAMENTOS EM ÁREAS URBANAS

Daniela Gírio Marchiori FARIA
Oswaldo AUGUSTO FILHO

RESUMO

O método de mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas mais utilizado atualmente no Brasil é o adotado pelo Ministério das Cidades. Com a finalidade de torná-lo mais sistemático e diminuir o grau de subjetividade na comparação e hierarquização dos setores de perigo, porém sem modificar sua abordagem fundamental, o presente trabalho propõe incorporar na análise o Processo de Análise Hierárquica (AHP). Para validar essa proposta foi realizado um ensaio de aplicação em áreas de risco a escorregamentos no Município de São Sebastião (SP), mapeadas anteriormente pelo Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (IG/SMA/SP), segundo a abordagem tradicional, ou seja, sem a incorporação sistemática do AHP. Os resultados do mapeamento do IG para uma das áreas (Vila Baiana), exemplificada neste trabalho, foram mais conservadores que aqueles obtidos com a incorporação do método AHP. A sua aplicação diminuiu a subjetividade e evidenciou a facilidade e praticidade na ponderação dos indicadores na classificação do perigo. A análise das opiniões de três especialistas nos julgamentos paritários dos indicadores de perigo a escorregamentos mostrou não haver discrepâncias na classificação do perigo.

Palavras-Chave: Mapeamento de perigo, mapeamento de risco, escorregamentos, Método AHP.

ABSTRACT

The method of hazard mapping of landslides in urban areas adopted by the Ministério das Cidades is the most currently used method in Brazil. In order to make it more systematic and to reduce the subjectivity in comparing and ranking hazardous areas, but without changing its fundamental approach, this paper proposes to incorporate the Analytic Hierarchy Process (AHP) into the analysis. To validate this proposal, this approach was tested in areas of landslide risk in the municipality of São Sebastião (SP), previously mapped by the Geological Institute of the Geological Institute of the Environmental Secretariat of São Paulo State (IG/SMA/SP), according to the traditional approach, i.e., without the systematic use of AHP. The results of the hazard mapping by the IG for one of these areas (Vila Baiana), exemplified in this work, were more conservative than those obtained using AHP. The application of AHP reduced the subjectivity and showed the ease and convenience in weighting the hazard indicators for hazard ranking. An analysis of the opinions of three experts in the parity judgment of landslide hazard indicators showed no discrepancies in the ranking of hazard.

Keywords: Hazard mapping, risk mapping, landslides, AHP Method.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os processos de instabilização de encostas estão entre os principais fenômenos relacionados a desastres naturais em áreas urbanas. Os escorregamentos em encostas estão associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados, repetindo-se a cada período chuvoso.

A identificação e análise de riscos consistem na primeira etapa para se estabelecer um programa de gerenciamento de riscos (UNDRO 1991). Sem o conhecimento da dimensão do problema, não há como planejar e agir adequadamente para resolvê-lo. O diagnóstico de risco deve: (1) informar quais são os indicadores ou evidências dos processos ambientais que, potencialmente, podem causar danos à população, às edificações ou à infraestrutura e descrevê-los, (2) estabelecer a hierarquização das situações identificadas e (3) estimar o número de edificações e de pessoas potencialmente afetadas (NOGUEIRA 2006).

O mapeamento de risco (identificação, análise dos riscos e delimitação das áreas de sua ocorrência) é executado por meio de trabalhos de campo, onde são avaliadas as possibilidades (probabilidades) de ocorrência dos processos destrutivos (perigo), a vulnerabilidade do elemento em risco (percentagem de perda esperada para o elemento submetido à situação perigosa) e as consequências sociais e/ou econômicas, caso ocorra um determinado processo destrutivo. Em termos absolutos, o risco deve expressar um cálculo de danos sociais e/ou econômicos por período de tempo.

CERRI (2006) relata que os mapeamentos de risco no Brasil e em muitos outros países são avaliações predominantemente qualitativas, ou seja, os riscos são identificados com base na opinião técnica da equipe que executa o mapeamento, com o apoio das informações dos moradores da área mapeada. Uma análise comparativa entre os resultados obtidos por diferentes equipes de campo é realizada como forma de padronizar a classificação do risco e garantir a uniformidade na linguagem e nos critérios adotados.

Mesmo reconhecendo as eventuais limitações, imprecisões e incertezas inerentes à análise qualitativa de riscos, os resultados dessa atividade podem ser decisivos para a eficácia de uma política de intervenções voltada à consolidação de uma ocupação. Para tanto, é imprescindível a adoção de métodos, critérios e procedimentos adequados, bem como a construção de modelos detalhados de

comportamento dos processos perigosos. Esses condicionantes, aliados à experiência da equipe executiva das atividades de identificação e análise de riscos, podem subsidiar a elaboração de programas adequados de gerenciamento de riscos, que reduzam substancialmente a ocorrência de acidentes geológicos, bem como tornam mínima a dimensão de suas consequências (CERRI & NOGUEIRA 2012).

Para aperfeiçoar as abordagens do mapeamento de risco considera-se pertinente sugerir e incorporar técnicas quantitativas que diminuam a subjetividade da análise de perigo de escorregamentos. Neste sentido o objetivo do presente trabalho é aprimorar o mapeamento do perigo e risco, com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (Analytic Hierarchy Process – AHP). Para a sua validação, o método foi aplicado em áreas de risco a escorregamentos do município de São Sebastião (SP), mapeadas anteriormente pelo Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente (IG-SMA), utilizando a abordagem tradicional.

Vale ressaltar como exemplo da importância da classificação do risco/perigo de forma coerente e menos subjetiva: o Sistema Informações para Habitação Social - HABISP no município de São Paulo (COELHO & MACHADO 2009), elaborado pela Secretaria de Habitação da Prefeitura de São Paulo. Esse sistema utiliza a classificação dos setores de risco do mapeamento de São Paulo como um dos indicadores de priorização para a implantação de obras de intervenção para a redução/minimização do risco em assentamentos urbanos precários, usando como ferramenta de apoio à decisão o método AHP.

2 MÉTODO DE MAPEAMENTO DE RISCO ADOTADO PELO MINISTÉRIO DAS CIDADES

Em 2003, com a criação do Ministério das Cidades, o Governo Federal instituiu no âmbito do Programa Urbanização, Regularização e Integração de Assentamentos Precários, a Ação de “Apoio à Prevenção e Erradicação de Riscos em Assentamentos Precários” com o objetivo de auxiliar a redução do risco. Esta Ação compreende três etapas (CARVALHO & GALVÃO 2006): 1) Treinamento de equipes municipais com o objetivo de capacitar técnicos das prefeituras para a elaboração de diagnóstico, prevenção e gerenciamento de risco; 2) Apoio financeiro para que o município elabore o Plano Municipal de

Redução de Risco - PMRR, que contempla: (a) o diagnóstico de risco (mapeamento), (b) as medidas de segurança necessárias para controle e redução dos riscos identificados, (c) a estimativa de recursos a serem implantados nas intervenções para a redução e controle dos riscos, (d) o estabelecimento de prioridades, (e) a compatibilização com os programas de urbanização de favelas e regularização fundiária; 3) Apoio financeiro para elaboração de projetos de contenção de encostas em áreas de risco consideradas prioritárias no PMRR.

Os trabalhos desenvolvidos por CERRI (2006) e CERRI *et al.* (2007) apresentam o método de mapeamento de risco associado a escorregamentos e inundação adotado pelo Ministério das Cidades como modelo para a elaboração do PMRR (Tabela 1).

Com base em levantamentos da Coordenação de Defesa Civil do Estado de São Paulo (CEDEC-SP) e do Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente/SP (IG-SMA), realizou-se o mapeamento de risco associado a escorregamentos em 96 municípios do Estado de São Paulo, sendo que em 81 deles adotou-se o método de mapeamento de risco do Ministério das Cidades.

3 O PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP)

O método AHP foi desenvolvido por Thomas L. Saaty em meados da década de 1970 com base em conceitos de matemática e psicologia. Este método fornece um procedimento comprehensivo e racional para modelar um problema de decisão, representando e quantificando as variáveis envolvidas em uma hierarquia de critérios ponderados por preferências (pesos). O resultado é um modelo que permite analisar várias alternativas com base na capacidade humana de usar a informação e a experiência para estimar magnitudes relativas por meio de comparações par a par realizadas de forma consistente e racional (TOMA & ASHARIF 2003, TRENTIM 2012). O método AHP auxilia a tomada de decisão e é capaz de justificá-la (TRENTIM 2012). Seu uso é indicado para problemas que envolvem a priorização de soluções potenciais a partir da avaliação de um conjunto de critérios (ASAHI *et al.* 1994, FINNIE & WITTIG 1999, KIM 1999).

A aplicação do método AHP (Figura 1) inicia-se pela decomposição do problema em uma estrutura hierárquica, que relaciona as metas e os níveis hierárquicos (Figura 2).

TABELA 1 – Métodos e procedimentos do mapeamento de risco adotado pelo Ministério das Cidades (CERRI *et al.* 2007).

<i>Etapas dos procedimentos de campo</i>
<ul style="list-style-type: none"> • elaborar e utilizar os modelos dos processos de instabilidade e as informações sobre a tipologia e os mecanismos de escorregamentos e de solapamentos de margens de córregos disponíveis na vasta literatura técnico-científica; • realizar trabalhos de campo, por meio de investigações geológico-geotécnicas de superfície, visando identificar condicionantes dos processos de instabilidade, evidências de instabilidade e indícios do desenvolvimento de processos destrutivos; • obter a localização precisa das áreas de risco, por meio de utilização de GPS (<i>Global Positioning System</i>), com no mínimo um ponto de leitura por área mapeada; • delimitar os setores de risco e, com base em julgamento dos profissionais encarregados do mapeamento de risco, atribuir, para cada setor, um grau de probabilidade de ocorrência de processo de instabilidade (escorregamento de encostas ou solapamento de margens de córregos), considerando o período de 1 ano. • representar cada setor de risco identificado em cópias de fotografias aéreas oblíquas de baixa altitude, a serem obtidas por meio de sobrevôos com helicóptero; • estimar as consequências potenciais do processo de instabilidade, por meio da avaliação das possíveis formas de desenvolvimento do processo destrutivo atuante (por exemplo, volumes mobilizados, trajetórias dos detritos, áreas de alcance etc.), definir e registrar o número de moradias ameaçadas (total ou parcialmente), em cada setor de risco; • indicar a(s) alternativa(s) de intervenção adequada(s) para cada setor de risco. Nos casos de ser possível a adoção de mais de uma alternativa de intervenção, essa possibilidade deve ser explicitada nas fichas de campo.

A partir do momento em que essa hierarquia lógica está construída, os tomadores de decisão avaliam sistematicamente as alternativas por comparação paritária em cada um dos critérios. Essa comparação pode utilizar dados concretos das alternativas ou julgamentos humanos (pesos) como forma de informação subjacente (SAATY 1990, 2008). Por outro lado, a atribuição de pesos para cada critério exige um conhecimento preciso do problema, que, normalmente, só é possível para um especialista.

Uma vez que as comparações e os pesos relativos entre os critérios foram estabelecidos, determina-se a razão de consistência (RC) dos julgamentos e se faz a aferição da coerência dos pesos atribuídos a cada par de critérios. Após essa análise calcula-se a valoração global para cada critério, a partir da multiplicação de cada prioridade do primeiro nível por sua respectiva do segundo nível, que indica a posição relativa de cada critério numa classificação final (SAATY 1980).

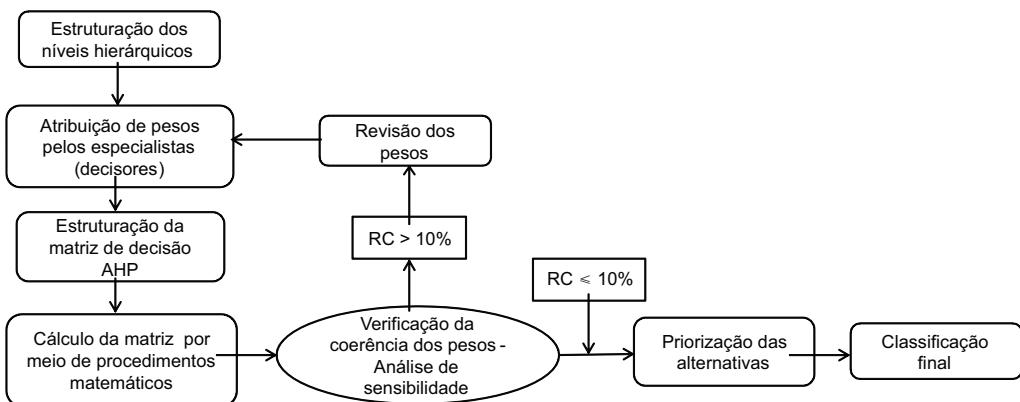


FIGURA 1 – Etapas principais do método AHP.

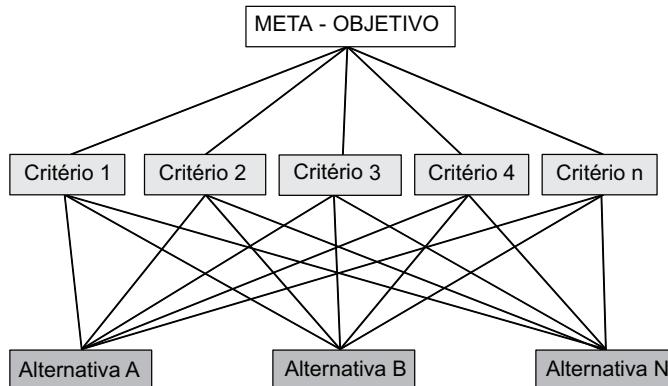


FIGURA 2 – Exemplo de estruturação hierárquica em dois níveis: critérios e alternativas (modificado de SAATY 1990).

As etapas do método AHP são descritas a seguir. Seus procedimentos matemáticos estão exemplificados passo a passo em TEKNOMO (2006).

3.1 Atribuição de pesos - Escala Fundamental de Saaty

Os critérios são comparados segundo uma escala de julgamentos, também denominada de Escala Fundamental de Saaty, que tem valores de 1 a 9, como mostra a tabela 2 (BORITZ 1992, SCHMIDT 1995).

Os números ímpares são usualmente usados para assegurar razoável distinção entre os

TABELA 2 – Escala de julgamento de importância no Método AHP (modificada de SAATY 1990).

Valores numéricos	Termos verbais	Explicação
1	Igual importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo.
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação a outra.
5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação a outra.
7	Muito fortemente mais importante	Alternativa fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é demonstrada na prática.
9	Extremamente mais importante	A evidência favorece uma alternativa em relação a outra, com grau de certeza mais elevado.
2, 4, 6 e 8	Valores importantes intermediários	Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições.

pontos da medição, ao passo que os pares só devem ser adotados quando o consenso natural não for alcançado entre os avaliadores, havendo necessidade de uma solução negociada (SAATY 1980).

3.2 Cálculo da matriz de comparação do vetor de prioridades.

A partir da Escala de Saaty é construída uma matriz de comparação recíproca (Tabela 3), estruturada de maneira que o critério 1 tenha preferência sobre o critério 2 e a diagonal principal da matriz seja representada pela unidade.

TABELA 3 – Matriz comparativa.

	Critério 1	Critério 2
Critério 1	1	Avaliação Numérica
Critério 2	1/Avaliação Numérica (Recíproco)	1

O cálculo da matriz de comparação resulta no “autovetor de prioridades”. A fórmula recomendada por SAATY (1990) para realizar o cálculo do autovetor consiste em elevar a matriz a potências arbitrariamente altas, dividindo-se a soma de cada linha pela soma dos elementos da matriz, ou seja, normalizando os resultados.

O autovetor determina a participação ou o peso relativo de cada critério no resultado total da meta e corresponde de modo aproximado à média aritmética dos valores de cada um dos critérios. De posse das importâncias relativas dos

critérios é verificada a integridade e coerência dos julgamentos por meio da análise de consistência.

3.3 Análise da consistência dos julgamentos

A integridade, qualidade ou coerência dos julgamentos é avaliada por meio do cálculo do “autovalor”. Essa análise, também denominada de “análise de sensibilidade”, indica se os julgamentos estão relacionados de modo lógico (PAMPLONA 1999).

SAATY (1990) propôs o seguinte procedimento para se realizar a Análise de Sensibilidade:

a) Estima-se inicialmente o “autovalor máximo” ($\lambda_{\text{máx}}$). A consistência de uma matriz positiva recíproca requer que o autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) seja igual ao número de linhas (ou colunas) da matriz de comparações paritárias n (número que representa a ordem da matriz). Quanto mais próximo $\lambda_{\text{máx}}$ for de n , mais consistente será o resultado. O autovalor é calculado pela equação (1);

$$\lambda_{\text{máx}} = T \cdot w \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: T é o autovetor normalizado, w corresponde à soma das colunas da matriz de comparações para cada critério.

a) Calcula-se o “índice de consistência” (IC). O IC de uma matriz de comparações paritárias indica quanto o autovalor está afastado do valor teórico esperado n , logo, esse desvio é dado pela expressão $(\lambda_{\text{máx}} - n)$. Essa diferença é medida em relação ao número de graus de liberdade da matriz

$(n - 1)$. Assim, o índice de consistência é dado pela equação (2):

$$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n)/(n - 1) \quad (\text{Eq. 2})$$

c) Calcula-se a “razão de consistência” (RC). Antes desse cálculo o índice de consistência (IC) deve ser comparado com o “índice de consistência aleatória” (CA) para determinar se a razão de consistência está satisfatória. O índice

de consistência aleatória também é denominado “índice randômico” (IR).

O índice de consistência aleatória (CA) representa o valor que seria obtido em uma matriz de comparações paritárias de ordem n onde não fossem realizados julgamentos lógicos, com valores aleatórios. SAATY (1980) calculou o índice de consistência aleatória para uma amostra de 500 matrizes recíprocas positivas, de ordem até 11 por 11 geradas aleatoriamente, cujos valores obtidos são apresentados na tabela 4.

TABELA 4 – Valores de consistência aleatória (CA) em função da ordem da matriz (SAATY 1980).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

A razão de consistência permite analisar o grau de violação da proporcionalidade e transitividade dos julgamentos do decisor. É calculada conforme equação (3):

$$RC = IC/CA \quad (\text{Eq. 3})$$

A razão de consistência (RC) é aceitável para valores menores ou iguais a 0,10 (10%). Valores acima de 10% indicam a existência de sérias inconsistências de julgamentos e o resultado da aplicação do método AHP é considerado “pobre” (incoerente). Neste caso, sugere-se a revisão da matriz de comparações de forma a tornar os julgamentos consistentes (SAATY 1990).

BORITZ (1992) aponta como um dos pontos fortes mais significativos do método AHP a capacidade de medir o grau de consistência presente nos julgamentos par a par e, desse modo, contribuir para assegurar que somente ordenações justificáveis sejam usadas como a base para avaliações.

3.4 Valoração global

A valoração global de cada uma das alternativas é realizada segundo o método da soma ponderada (SAATY 1980), expressa pela equação (4):

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j v_j(a), \quad (\text{Eq. 4})$$

com $\sum_{j=1}^n p_j = 1$ e $0 < p_j < 1$ ($j = 1, \dots, n$)

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 .

Segundo ENSSLIN *et al.* (2001), um modelo considerado “estável”, ou seja, bem estruturado, as pequenas alterações na atribuição dos pesos não modificam significativamente os resultados.

Assim, a execução de todos os procedimentos descritos anteriormente permite a coleta de subsídios consistentes para uma tomada de decisão em relação a um problema complexo.

O mercado de informática disponibiliza programas que implementam o método AHP e promovem a simplificação do processo de avaliação e a execução dos cálculos matriciais e dos índices de consistência (CHOIRAT & SERI 2001, SAUNDERS 1994). Entretanto, em análises simples, como no caso desse trabalho, os cálculos matriciais e os índices de consistência podem ser executados em um programa de estruturação de planilhas, como, por exemplo, o *Microsoft Excel*.

4 MÉTODO E ETAPAS DO TRABALHO

4.1 Definição da área de estudo

A área definida para aplicação do método AHP foi o Município de São Sebastião, SP (Figura 3). Os escorregamentos que ocorrem nas encostas urbanas do município de São Sebastião, assim como em grande parte do Litoral Norte, estão relacionados a taludes de corte e aterros na encosta.

São escorregamentos que mobilizam pouco volume de material, mas suficiente para causar danos às pessoas e bens.

No universo de 19 áreas mapeadas pelo IG neste município em 2005 (SMA 2006), seis delas foram selecionadas (Figura 3) para aplicação do método AHP com base nas recomendações da “Carta de Risco a Movimentos de Massa e Inun-

dação” (SMA 1996). Essas áreas são representativas dos processos de escorregamentos descritos conforme a classificação de AUGUSTO FILHO (1992), adotada neste trabalho.

O termo *perigo*, adotado nesse estudo, refere-se à probabilidade (ou frequência) de ocorrência de um fenômeno destrutivo (AUGUSTO FILHO *et al.* 1990).

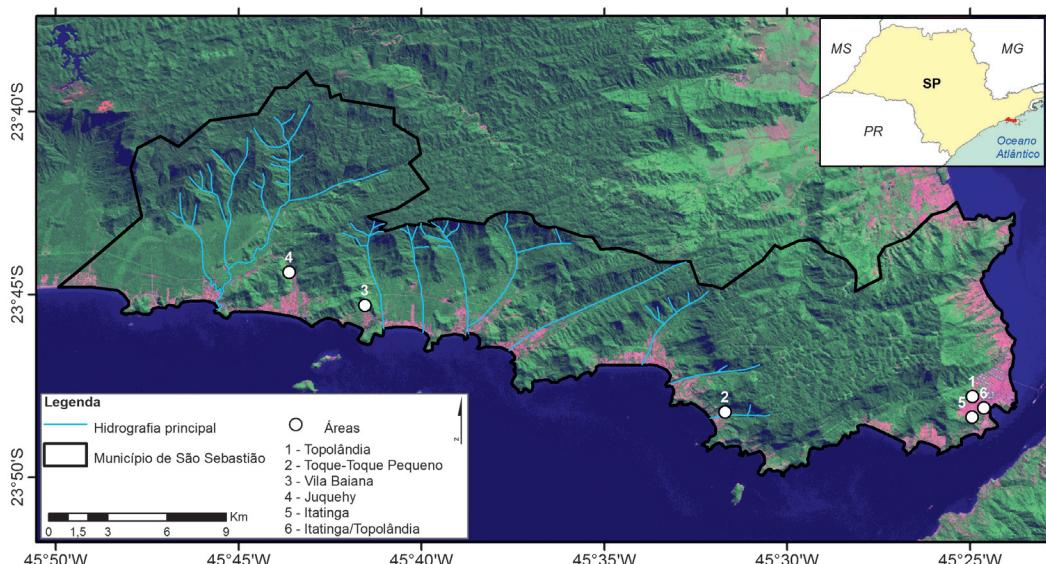


FIGURA 3 – Localização das áreas de risco a escorregamentos no Município de São Sebastião (Imagem de satélite Landsat 7, 2012).

O mapeamento de perigo com a incorporação do método AHP e a comparação com o método tradicional foram realizados nessas seis áreas. No presente artigo são exemplificados os resultados da Área 3, denominada Vila Baiana

(Figura 4). Essa área está localizada no bairro Barra do Sahy, próximo à Rodovia SP 55, sentido Santos, com acesso pelas Ruas Manoel Neto e Ricardo Queiroz. Nessa área foram mapeados 3 setores de risco.

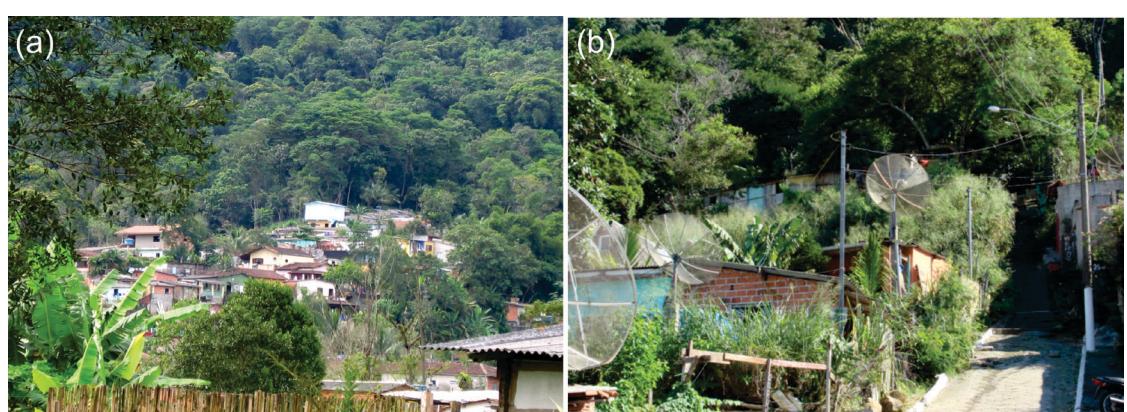


FIGURA 4 – (a) Vista geral da ocupação na Área 3 (Vila Baiana); (b) detalhe de moradias construídas em encosta com declividade acentuada (Fonte: Acervo IG-SMA, 2005).

4.2 Estruturação dos níveis hierárquicos

O método AHP foi definido como procedimento básico para o desenvolvimento da análise de perigo de escorregamento em áreas urbanas. Apesar de existirem programas de AHP disponíveis, inclusive com licença-livre, optou-se por estruturar os procedimentos desta técnica em um ambiente de planilha eletrônica do Programa Excel (Microsoft). Este programa foi escolhido devido a sua ampla disseminação, facilidade de uso e possibilidade de ser incorporado em dispositivos portáteis como os *tablets*, para uso direto nos trabalhos de campo.

As principais etapas do método AHP, aplicado ao mapeamento de perigo (Figura 1), serviram para classificar, em ordem de importância, os indicadores de perigo e suas respectivas classes para cada natureza de encosta/talude identificadas nos trabalhos de campo.

4.2.1 A natureza da encosta/talude e os tipos de processos de escorregamento: classificações

As classificações da natureza da encosta/talude e dos tipos de processos de escorregamentos foram estabelecidas com base nos trabalhos de campo e na literatura científica. Além disso, foram estabelecidas de forma que a interpretação dos resultados com a aplicação do método AHP fosse rápida e fácil, sem prejudicar a qualidade da análise.

A natureza da encosta/talude identificada nas seis áreas foi classificada em quatro tipos:

- Encosta natural;

- Talude de corte em solo/rocha;
- Bloco rochoso;
- Talude de aterro.

Os processos de escorregamentos foram agrupados em quatro tipos básicos, conforme a natureza da encosta/talude:

- Escorregamento raso de solo em encosta natural;
- Escorregamento de solo e rocha em talude de corte;
- Rolamento/desplacamento de blocos rochosos;
- Escorregamento em aterro (solo, entulho/lixo).

O tipo de processo adotado em cada setor analisado foi o predominante. Quando identificado mais de um tipo com potencial elevado de ocorrência no mesmo setor (por exemplo: escorregamentos de solo e de rocha em taludes de corte), realizou-se a análise de perigo para ambos e adotou-se o maior valor do índice de perigo.

4.2.2 Seleção dos indicadores de perigo e suas respectivas classes

Os condicionantes geológico-geotécnicos e ambientais dos processos de escorregamentos denominados indicadores de perigo foram agrupados em tipos e classes específicas. Após a seleção desses indicadores atribuiu-se pesos relativos a cada um deles para a aplicação do método AHP.

A figura 5 exemplifica os tipos (nível hierárquico 1) e classes (nível hierárquico 2) de indicadores de perigo adotados para análise e mapeamento dos setores de perigo para o escorregamento raso de solo em encostas naturais.

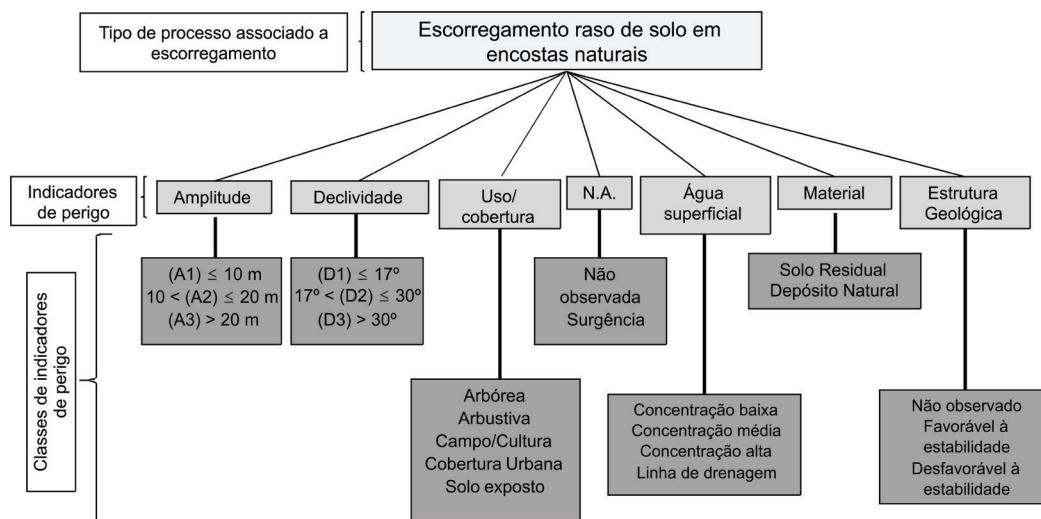


FIGURA 5 – Estruturação dos níveis hierárquicos para a aplicação do método AHP, adotados para análise e mapeamento dos setores de perigo para o escorregamento raso em encostas naturais.

A seleção dos tipos de indicadores de perigo apoiou-se nos trabalhos de CERRI (1993), MACE-DO (2001) e nos trabalhos de mapeamento de áreas de risco de escorregamentos em encostas urbanas com abordagem qualitativa (FUNDUNESP 2003; CERRI *et al.* 2004, 2007; CANIL *et al.* 2004; MACEDO *et al.* 2004a, b; FARIA *et al.* 2005 e SANTORO *et al.* 2005).

A seleção das classes de indicadores de perigo baseou-se nos trabalhos de YOSHIKAWA (1997), MACE-DO (2001), FUNDUNESP (2003) e SMA (2006).

4.3 Atribuição de pesos conforme a Escala Fundamental de Saaty

O procedimento de atribuição de pesos relativos, conforme a Escala Fundamental de Saaty, foi realizado para os dois níveis hierárquicos dos indicadores de perigo. A figura 6 ilustra um exemplo deste procedimento para o nível hierárquico 1 (indicadores de perigo): declividade e uso/cobertura do solo.

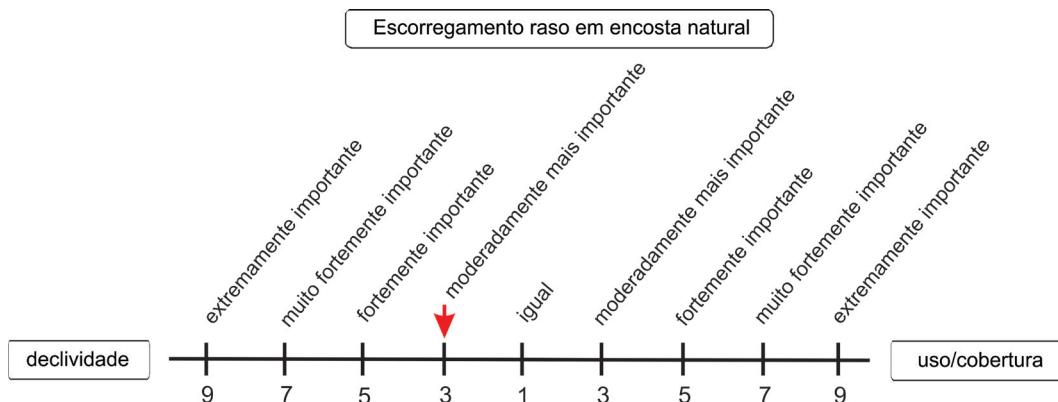


FIGURA 6– Escala Fundamental de Saaty. Comparação par a par da declividade e do uso/cobertura do solo exemplificado para o processo de escorregamento raso em encosta natural.

A autora deste trabalho (Daniela G. M. Faria) realizou os primeiros julgamentos e, posteriormente, como forma de se aferir os resultados da análise de perigo, três outros especialistas fizeram uma reavaliação (julgamentos).

4.4 Estruturação da matriz de decisão AHP

Após a aplicação do método AHP para cada tipo de processo, as matrizes de decisão dos indicadores de perigo e suas respectivas classes foram estruturadas (Tabela 5).

TABELA 5 – Estruturação da matriz de decisão AHP para o processo de escorregamento raso de solo em encostas naturais. Marcações em azul indicam a comparação par a par exemplificada na figura 6.

Indicadores de perigo	Amplitude	Declividade	Uso/ Cobertura	Nível d'água (NA)	Água superficial	Material	Estrutura Geológica
Amplitude	1	1/5	1/3	1/3	2	2	5
Declividade	5	1	3	3	2	5	7
Uso/cobertura	3	1/3	1	2	2	5	5
Nível d'água (NA)	3	1/3	1/2	1	3	3	8
Água superficial	1/2	1/2	1/2	1/3	1	3	5
Material	1/2	1/5	1/5	1/3	1/3	1	3
Estrutura Geológica	1/5	1/7	1/5	1/8	1/5	1/3	1

Após a estruturação de cada matriz, realizou-se as operações de normalização dos pesos relativos nas matrizes de comparação e se obteve o vetor de prioridades ou autovetor, o qual fornece o peso relativo de cada indicador de perigo expresso em percentagem.

A aferição da coerência da atribuição dos pesos foi realizada por meio da análise de sensibilidade, calculando-se a Razão de Consistência (RC). Quando a razão de consistência indicar que os julgamentos estão coerentes, o vetor de prioridades é aceito e realiza-se a classificação final mediante o cálculo do índice de perigo (IP, Equação 5):

$$IP = \sum_{i=1}^n p_i x_i / 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

onde:

p = peso do condicionante do processo (indicador de perigo);

x = peso da classe do respectivo indicador de perigo.

Esse índice é calculado para cada natureza de encosta e tipo de processo de escorregamento, identificados nos setores analisados.

A classificação final é a hierarquização dos índices de perigo.

4.5 Mapeamento e estruturação das bases de dados com a aplicação do método AHP.

As seis áreas de risco selecionadas no município de São Sebastião (SP) foram mapeadas utilizando a planilha de análise de perigo com a incorporação do método AHP. Cada planilha foi composta por quatro tabelas principais: a) entrada de dados; b) chave de ponderação; c) índice de perigo; 4) classificação do perigo. As três primeiras foram estruturadas para cada uma das seis áreas mapeadas, enquanto que a quarta tabela, denominada de classificação do perigo, agrupa todos os setores mapeados.

– Entrada de dados

Nesta tabela, elaborada para armazenar os dados do levantamento de campo do mapeamento de risco realizado pelo IG/SMA (SMA 2006), constam os seguintes dados: localização, área de estudo, data, equipe de campo, processos identificados, indicadores de perigo, consequências (número de

moradias ameaçadas), números das fotos aéreas, registros fotográficos de campo e dados de posicionamento (*Global Positioning System*). Cada linha da tabela armazena um setor da análise de perigo, que foi definido com base na natureza da encosta/talude e nos tipos de processos de instabilização predominantes. No caso de ocorrerem mais de um processo no setor, a análise é realizada para cada um deles.

– Chave de ponderação

Esta tabela armazena as classes dos indicadores de perigo e seus respectivos pesos, considerando a natureza da encosta e os tipos de processos de escorregamentos. Atribuiu-se para cada classe uma letra associada a um número, enquanto que os pesos relativos das classes foram atribuídos pelo Processo de Análise Hierárquica (AHP), a partir do cálculo da matriz de decisão.

– Índice de perigo (IP)

A partir das informações de cada área mapeada gerou-se uma tabela do IP. A hierarquização dos índices de perigo identificados nas áreas mapeadas obedeceu a tabela de classificação do perigo.

– Classificação do Perigo

Na estruturação da tabela de classificação geral do perigo utilizou-se todos os dados de IP dos vinte e um setores mapeados. Sua função é classificar os índices de perigo para cada natureza de encosta/talude e tipo de processo de escorregamento em perigo baixo, médio, alto e muito alto (Tabela 6). Adotou-se os seguintes critérios:

a) a média aritmética (\bar{X}) dos valores numéricos do índice de perigo, somada ou subtraída da metade do desvio padrão (Δ) (Equação 6):

$$IP = \bar{X} \mp 1/2 \Delta \quad (\text{Eq. 6})$$

b) presença de feições de instabilidade expressivas, classificando o perigo como “muito alto”.

4.6 Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo desenvolveram-se no período maio-julho de 2009, com o objetivo

TABELA 6 – Critérios adotados para a classificação do índice de perigo (IP).

Índice de Perigo (IP)	Grau de Perigo
$IP < \bar{X} - 1/2 \Delta$	Baixo
$\bar{X} - 1/2 \Delta \leq IP \leq \bar{X} + 1/2 \Delta$	Médio
$IP > \bar{X} + 1/2 \Delta$	Alto
Presença de feições de instabilidade expressivas	Muito Alto

de identificar a tipologia dos processos associados a escorregamentos, os indicadores de perigo e suas respectivas classes para a aplicação do AHP. Para o mapeamento de perigo de escorregamento das seis áreas selecionadas aplicou-se a planilha de análise de perigo.

Os setores de perigo foram delimitados em ortofotos impressas nas escalas 1:1.000 a 2.000. Essas ortofotos originalmente estão na escala 1:25.000 e o ano de sobrevôo é 2001 (Projeto de Preservação da Mata Atlântica/PPMA – IF/SMA). Posteriormente esses setores foram repassados para bases cartográficas geradas a partir das fotos aéreas digitais, utilizando o Sistema de Informação Geográfica – SIG Arcgis 9.3. Essas bases foram exportadas para o formato de arquivos de imagem do tipo *jpg* (*joint photographic group*), que podem ser editados por programas comuns e facilmente disponíveis como *Microsoft Power Point, Paint, Corel Draw*, entre outros.

No zoneamento do perigo, a delimitação dos setores em campo foi realizada com base nos seguintes procedimentos:

- pré-setorização a uma distância que possibilasse a visão geral do cenário de risco, observando o relevo e a forma de ocupação da área a ser mapeada. Nesta etapa foram considerados: a posição da ocupação em relação a encosta (topo, meia-encosta e base, com possibilidades de queda, queda ou atingimento e atingimento, respectivamente), forma do perfil da encosta (retilínea, convexo, côncavo, côncavo-convexo), identificação da tipologia dos processos esperados e a

delimitação da área possível de ser afetada pelo processo;

- setorização em escala de detalhe, verificando localmente as observações realizadas à distância e identificando os indicadores de perigo e as feições de instabilidade em cada setor.

Destaca-se que no zoneamento são delimitados setores com moradias em situação de perigo similar, o que permite a homogeneização dessas condições de perigo para um dado setor. Portanto, não é aconselhável delimitar setores extensos, evitando generalizações.

4.7 Aplicação da planilha de análise de perigo com a opinião de especialistas

Para a realização desta etapa, três especialistas selecionados utilizaram:

- a Escala de Saaty para comparação par a par dos indicadores e suas respectivas classes de atributos;
- os mesmos indicadores e suas classes já descritos anteriormente;
- os mesmos dados de entrada coletados no levantamento de campo de 2009, bem como a mesma setorização.

As matrizes de decisão AHP foram estruturadas conforme os julgamentos paritários dos especialistas. Em seguida, a planilha de análise de perigo correspondente à opinião de cada especialista foi aplicada para as seis áreas mapeadas e seus resultados comparados.

5 RESULTADOS

5.1 Aplicação do método AHP

Os resultados dos cálculos da Matriz de Decisão AHP e da análise de sensibilidade são exemplificados para o processo de escorregamento raso de solo em encostas naturais na tabela 7.

A natureza da encosta/talude, tipos de processos de escorregamentos, indicadores de perigo e suas respectivas classes (identificados nos trabalhos de campo e utilizados na aplicação do método AHP), bem como os pesos desses indicadores, calculados na Matriz de Decisão AHP, são apresentados na tabela 8.

TABELA 7 – Matriz de Decisão AHP, autovetor (pesos) e análise de sensibilidade dos indicadores de perigo para o processo de escorregamento raso de solo em encostas naturais.

Matriz Recíproca

<i>Indicadores de perigo</i>	<i>Amplitude</i>	<i>Declividade</i>	<i>Uso/ Cobertura</i>	<i>Nível d'água (NA)</i>	<i>Água superficial</i>	<i>Material</i>	<i>Estrutura geológica</i>
<i>Amplitude</i>	1	1/5	1/3	1/3	2	2	5
<i>Declividade</i>	5	1	3	3	2	5	7
<i>Uso/cobertura</i>	3	1/3	1	2	2	5	5
<i>Nível d'água (NA)</i>	3	1/3	1/2	1	3	3	8
<i>Água superficial</i>	1/2	1/2	1/2	1/3	1	3	5
<i>Material</i>	1/2	1/5	1/5	1/3	1/3	1	3
<i>Estrutura geológica</i>	1/5	1/7	1/5	1/8	1/5	1/3	1
SOMA	13,20	2,71	5,73	7,13	10,53	19,33	34,00

Matriz Normalizada							Soma	<i>Autovetor (%)</i>	
0,076	0,074	0,058	0,047	0,190	0,103	0,147	0,695	9,93	Amplitude
0,379	0,369	0,523	0,421	0,190	0,259	0,206	2,347	33,52	Declividade
0,227	0,123	0,174	0,281	0,190	0,259	0,147	1,401	20,01	Uso/Cobertura
0,227	0,123	0,087	0,140	0,285	0,155	0,235	1,253	17,90	Nível d'água (NA)
0,038	0,185	0,087	0,047	0,095	0,155	0,147	0,754	10,77	Água superficial
0,038	0,074	0,035	0,047	0,032	0,052	0,088	0,365	5,21	Material
0,015	0,053	0,035	0,018	0,019	0,017	0,029	0,186	2,66	Estrutura geológica
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	7,000	100,0	
autovalor ($\lambda_{\text{máx}}$)			7,6867				n = 7		
índice de consistência (IC)			11,44%						
<i>razão de consistência (RC)</i>			8,67%	< 10%					

5.2 Análise do Perigo

Esta análise foi construída com base nos resultados dos cálculos da média aritmética de 41 valores de índice de perigo obtidos para os diferentes tipos de processos de escorregamentos identificados nos 21 setores (Tabela 9).

A média aritmética (\bar{X}) dos valores do índice de perigo é 32,40, o desvio padrão (Δ) é de 11,19, enquanto o valor do coeficiente de varia-

ção é de 0,3453, ou seja, menor que 0,4 (40%), indicando a homogeneidade dos dados (valores entre 5 e 40% indicam amostragem homogênea). Substituindo os valores da média e do desvio padrão na expressão de $IP = \bar{X} \pm \frac{1}{2}\Delta$, têm-se: $IP = 32,40 \pm \frac{1}{2}(11,19)$, resulta valores de $IP = 26,80$ e $IP = 37,99$.

Com base na definição dos intervalos do IP, os critérios aplicados na análise do perigo de escorregamento para os 21 setores resultantes do mapeamento com o método AHP é apresentado na tabela 10.

TABELA 8 – Pesos dos indicadores de perigo e de suas respectivas classes com a aplicação do AHP.

Encosta/Talude		Natural		Corte		Escorregamento solo/rocha		Bloco Rochoso		Atterro	
Processo	Indicadores de Perigo	Pesos (%)	Classes	Pesos (%)	Classes	Pesos (%)	Classes	Pesos (%)	Classes	Pesos (%)	Classes
Amplitude	(A1) ≤10 m	6,69	(A1) ≤2 m	5,69	(A1) ≤10 m	6,69	(A1) ≤2 m	6,69	(A1) ≤2 m	5,69	(A1) ≤2 m
	(A2) 10 < A ≤20 m	22,00	(A2) 2 < A ≤5 m	12,19	(A2) 10 < A ≤20 m	22,00	(A2) 2 < A ≤5 m	9,51	(A2) 2 < A ≤5 m	12,19	(A2) 2 < A ≤5 m
	(A3) >20 m	71,32	(A3) 5 < A ≤10 m	26,33	(A3) >20 m	71,32	(A3) 5 < A ≤10 m	-	(A3) 5 < A ≤10 m	26,33	(A3) 5 < A ≤10 m
Declividade	(D1) ≤17°	6,69	(D1) ≤17°	4,35	(D1) ≤17°	12,37	(D2) 17° < D ≤30°	4,35	(D1) ≤17°	6,69	(D1) ≤17°
	(D2) 17° < D ≤30°	22,00	(D2) 17° < D ≤30°	10,18	(D2) 17° < D ≤30°	12,37	(D3) 30 < D ≤60°	27,09	(D2) 17° < D ≤30°	22,00	(D2) 17° < D ≤30°
	(D3) >30°	71,32	(D4) D >60°	56,19	(D4) D >60°	56,19	(D3) >30°	-	(D3) >30°	71,32	(D3) >30°
Uso/Cobertura	(U1) Arbórea	3,72	(U1) Arbórea	3,72	(U1) Arbórea	3,72	(U2) Arbustiva	6,70	(U1) Arbórea	3,72	(U1) Arbórea
	(U2) Arbustiva	6,70	(U2) Arbustiva	6,70	(U2) Arbustiva	6,70	(U3) Campo/Cultura	14,22	(U2) Arbustiva	6,70	(U2) Arbustiva
	(U3) Campo/Cultura	14,22	(U3) Campo/Cultura	14,22	(U3) Campo/Cultura	14,22	(U4) Cobertura Urbana	21,16	(U3) Campo/Cultura	6,70	(U3) Campo/Cultura
	(U4) Cobertura Urbana	21,16	(U4) Cobertura Urbana	21,16	(U4) Cobertura Urbana	21,16	(U5) Solo Exposto	54,20	(U4) Cobertura Urbana	21,16	(U4) Cobertura Urbana
	(U5) Solo Exposto	54,20	(U5) Solo Exposto	54,20	(U5) Solo Exposto	54,20	(U5) Solo Exposto	-	(U5) Solo Exposto	54,20	(U5) Solo Exposto
N.4.	(NA1) Não observado	10,00	(NA1) Não observado	10,00	(NA1) Não observado	10,00	(NA1) Não observado	10,00	(NA1) Não observado	10,00	(NA1) Não observado
	(NA2) Surgência	90,00	(NA2) Surgência	90,00	(NA2) Surgência	90,00	(NA2) Surgência	90,00	(NA2) Surgência	90,00	(NA2) Surgência
Água superficial	(AS1) Concentração baixa	4,48	(AS1) Concentração baixa	4,48	(AS1) Concentração baixa	4,48	(AS2) Concentração média	9,85	(AS1) Concentração baixa	4,48	(AS1) Concentração baixa
	(AS2) Concentração média	9,85	(AS2) Concentração média	9,85	(AS2) Concentração média	9,85	(AS3) Concentração alta	24,09	(AS2) Concentração média	9,85	(AS2) Concentração média
	(AS3) Concentração alta	24,09	(AS3) Concentração alta	24,09	(AS3) Concentração alta	24,09	(AS4) Linha de drenagem	61,57	(AS3) Concentração alta	24,09	(AS3) Concentração alta
	(AS4) Linha de drenagem	61,57	(AS4) Linha de drenagem	61,57	(AS4) Linha de drenagem	61,57	(AS4) Linha de drenagem	61,57	(AS4) Linha de drenagem	61,57	(AS4) Linha de drenagem
Material	(M1) Solo Residual	12,50	(M1) Solo Residual	21,04	(M1) Solo residual	5,55	(M2) Depósito natural	54,46	(M1) Solo residual	5,55	(M1) - Solo
	(M2) Depósito Natural	87,50	(M2) Depósito Natural	48,13	(M2) Depósito natural	54,46	(M3) Rocha Alterada	22,92	(M2) Depósito natural	54,46	(M2)- Lixo/Entulho
Estrutura geológica	(M3) - Depósito Natural	13,59	(M3) - Depósito Natural	21,04	(M3) Rocha alterada	5,10	(M4) Rocha Sã	17,08	(M3) - Depósito Natural	22,92	(M3) - Misto (solo, lixo e entulho)
	(M4) - Rocha Sã	9,79	(M4) - Rocha Sã	9,79	(M4) Rocha sã	-	(M1) Solo residual	5,55	(M1) - Solo	11,50	(M1) - Solo
	(NO) Não observada	-	(NO) Não observada	7,14	(NO) Não observada	6,69	(E1) 1 família de fraturas	-	(NO) Não observada	6,69	(NO) Não observada
Contato	(E1) Favorável à estabilidade	7,14	(E1) Favorável à estabilidade	18,04	(E1) Favorável à estabilidade	18,04	(E2) 2 ou mais famílias de fraturas	-	(E1) 1 família de fraturas	-	(E1) 1 família de fraturas
	(E2) Desfavorável à estabilidade	74,82	(E2) Desfavorável à estabilidade	74,82	(E2) Desfavorável à estabilidade	74,82	(E3) Desfavorável à estabilidade	-	(E2) 2 ou mais famílias de fraturas	-	(E2) 2 ou mais famílias de fraturas
Plano basal	-	-	-	-	-	-	-	10,03	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	7,02	(B1) 0 < P ≤15°	6,69	(B1) 0 < P ≤15°
	-	-	-	-	-	-	-	-	(B2) 15° < P ≤35°	22,00	(B2) 15° < P ≤35°
Forma geométrica	-	-	-	-	-	-	-	-	(B3) >35°	71,32	(B3) >35°
	-	-	-	-	-	-	-	-	(F1) Lascá	6,69	(F1) Lascá
Área de contato	-	-	-	-	-	-	-	-	(F2) Laje	22,00	(F2) Laje
	-	-	-	-	-	-	-	-	(F3) Arredondada ou Cúbica	71,32	(F3) Arredondada ou Cúbica
	-	-	-	-	-	-	-	-	(AC1) Área maior	10,00	(AC1) Área maior
	-	-	-	-	-	-	-	-	(AC2) Área menor	90,00	(AC2) Área menor

TABELA 9 – Resultados da análise de perigo realizada para os 41 índices de perigo. Feições de instabilidade: FI2 e FI3 significam, respectivamente, presença de trincas em paredes e/ou pisos e presença de cicatrizes de escorregamentos.

Área	Setor	Encosta	Processo	Feições de Instabilidade	Análise de Perigo		Consequências		Classificação do Perigo
					Índice	Grau	Casa Alvenaria	Casa Madeira	
ÁREA 1 - Topolândia	A1_S1	Bloco_rochoso	Rolamento/Desplacamento	FI2	39,84	Muito Alto	16	4	Alto
	A1_S1	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		30,99	Muito Alto	16	4	Médio
	A1_S2	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		28,07	Médio	64	0	Médio
	A1_S3	Bloco_rochoso	Rolamento/Desplacamento		25,06	Baixo	1	0	Baixo
ÁREA 2 - Toque-Toque Pequeno	A2_S1	Natural	Escorregamento raso de solo		38,75	Alto	10	2	Alto
	A2_S1	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		30,13	Médio	10	2	Médio
	A2_S2	Natural	Escorregamento raso de solo		38,75	Alto	15	5	Alto
	A2_S2	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		30,15	Médio	15	5	Médio
	A2_S2	Bloco_rochoso	Rolamento/Desplacamento		27,85	Médio	15	5	Médio
	A2_S3	Natural	Escorregamento raso de solo		11,90	Baixo	8	3	Baixo
	A2_S3	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		22,13	Baixo	8	3	Baixo
ÁREA 3 - Vila Baiana	A3_S3	Aterro	Escorregamento	FI2; FI3	17,42	Baixo	8	3	Baixo
	A3_S1	Natural	Escorregamento raso de solo		18,31	Baixo	30	10	Baixo
	A3_S1	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		28,83	Médio	30	10	Médio
	A3_S1	Aterro	Escorregamento		24,15	Baixo	30	10	Baixo
	A3_S2	Aterro	Escorregamento		31,34	Muito Alto	1	0	Médio
	A3_S3	Natural	Escorregamento raso de solo		28,43	Médio	15	5	Médio
ÁREA 4 - Juquehy	A3_S3	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		20,64	Baixo	15	5	Baixo
	A4_S1	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		43,67	Muito Alto	32	0	Alto
	A4_S1	Aterro	Escorregamento		36,28	Muito Alto	32	0	Médio
	A4_S2	Natural	Escorregamento raso de solo		13,42	Baixo	10	0	Baixo
	A4_S2	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		14,47	Baixo	10	0	Baixo
	A4_S3	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		23,60	Baixo	5	0	Baixo
ÁREA 5 - Itatinga	A4_S4	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		28,83	Médio	14	0	Médio
	A5_S1	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		46,12	Alto	4	0	Alto
	A5_S2	Natural	Escorregamento raso de solo		38,20	Alto	8	0	Alto
	A5_S2	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		32,65	Médio	8	0	Médio
	A5_S2	Aterro	Escorregamento		28,09	Médio	8	0	Médio
	A5_S3	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		45,37	Alto	30	0	Alto
	A5_S3	Bloco_Rochoso	Rolamento/Desplacamento		40,95	Alto	30	0	Alto
	A5_S4	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		28,27	Médio	30	0	Médio
	A5_S5	Natural	Escorregamento raso de solo		48,48	Alto	18	0	Alto
	A5_S5	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		51,42	Alto	18	0	Alto
ÁREA 6 - Topolândia/Itatinga	A6_S1	Natural	Escorregamento raso de solo	FI2	40,00	Alto	60	0	Alto
	A6_S1	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		39,46	Alto	60	0	Alto
	A6_S1	Aterro	Escorregamento		28,09	Médio	60	0	Médio
	A6_S2	Natural	Escorregamento raso de solo		54,32	Muito Alto	1	0	Alto
	A6_S2	Corte	Escorregamento Solo/Rocha	FI2	55,92	Muito Alto	1	0	Alto
	A6_S3	Natural	Escorregamento raso de solo		40,00	Alto	34	0	Alto
	A6_S3	Corte	Escorregamento Solo/Rocha		39,46	Alto	34	0	Alto
	A6_S3	Aterro	Escorregamento		28,09	Médio	34	0	Médio

TABELA 10 – Critérios aplicados na análise de perigo de escorregamento para os 21 setores mapeados com o método AHP.

<i>Índice de Perigo (IP)</i>	<i>Grau de Perigo</i>
IP <26,80	Baixo
26,80 ≤ IP ≤ 37,99	Médio
IP >37,99	Alto
Presença de feições de instabilidade	Muito Alto

Esses resultados permitiram estabelecer uma correlação entre os critérios da classificação de risco adotada pelo Ministério das Cidades e a de perigo com a aplicação do método AHP (Tabela 11).

Ressalta-se que o grau de perigo muito alto foi definido de acordo com a metodologia do Ministério das Cidades, ou seja, com base na presença de evidências de instabilidade expressivas e presentes em grande número ou magnitude. Assim como nas demais classificações de perigo, os con-

dicionantes geológico-geotécnicos serão sempre analisados nos setores classificados como perigo muito alto, sendo possível verificar a contribuição de cada um deles no desenvolvimento de determinado processo de escorregamento.

5.3 Aplicação da planilha de análise de perigo com a opinião de especialistas

Os especialistas que participaram desse estudo tinham o seguinte perfil: especialista 1: 28 anos de formação em Geologia e 27 anos de experiência em risco geológico-geotécnico; especialista 2: 30 anos de formação em Geologia e 25 anos de experiência em risco geológico-geotécnico; e, especialista 3: 25 anos de formação em Geologia e 15 anos de experiência em risco geológico-geotécnico. Os seus julgamentos paritários para os intervalos dos índices de perigo e respectiva classificação estão apresentados na tabela 12, enquanto os resultados das análises de perigo para a Vila Baiana compõem a tabela 13.

TABELA 11 – Correlação entre os critérios da classificação de risco do método adotado pelo Ministério das Cidades e da classificação do perigo com a aplicação do método AHP.

<i>GRAU DE PERIGO</i>	<i>ÍNDICE DE PERIGO (IP)</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>
P1 Baixo	IP <26,80	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (declividade, tipo de terreno, etc) e o nível de intervenção no setor são de baixa potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas. É a condição menos crítica. Mantidas as condições existentes, são muitas reduzidas as possibilidades de ocorrência de eventos destrutivos no período de 1 ano.
P2 Médio	26,80 ≤ IP ≤ 37,99	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (declividade, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos. Mantidas as condições existentes, são médias as possibilidades de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período de 1 ano.
P3 Alto	IP >37,99	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (declividade, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos. Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período de 1 ano.
P4 Muito Alto	Presença de feições de instabilidade	As evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, etc) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. É a condição mais crítica, necessitando de intervenção imediata devido ao seu elevado estágio de desenvolvimento. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período de 1 ano.

TABELA 12 – Resultados dos critérios utilizados na análise do perigo de escorregamentos segundo os três especialistas consultados e a autora deste trabalho.

<i>Especialista 1</i>	
Índice de Perigo (IP)	Grau de Perigo
IP < 29,91	Baixo
29,91 ≤ IP ≤ 39,27	Médio
IP > 39,27	Alto
Presença de feições de instabilidade	Muito Alto
<i>Especialista 2</i>	
Índice de Perigo (IP)	Grau de Perigo
IP < 32,90	Baixo
32,90 ≤ IP ≤ 41,12	Médio
IP > 41,12	Alto
Presença de feições de instabilidade	Muito Alto
<i>Especialista 3</i>	
Índice de Perigo (IP)	Grau de Perigo
IP < 31,19	Baixo
31,19 ≤ IP ≤ 39,93	Médio
IP > 39,93	Alto
Presença de feições de instabilidade	Muito Alto
<i>Autora deste trabalho</i>	
Índice de Perigo (IP)	Grau de Perigo
IP < 26,80	Baixo
26,80 ≤ IP ≤ 37,99	Médio
IP > 37,99	Alto
Presença de feições de instabilidade	Muito Alto

Os resultados finais dos especialistas e da autora do trabalho apresentado na tabela 13 foram iguais. No setor A3/S2, os resultados do grau de perigo para o processo de escorregamento em talude de aterro, foram iguais para as quatro classificações, classificado como médio. No setor 3, os julgamentos realizados pelo especialista 1 para o processo de escorregamento natural foram menos conservadores que os demais especialistas.

5.4 Comparação dos setores de risco e de perigo resultantes dos mapeamentos tradicional e pelo método AHP

O mapeamento de risco realizado pelo Instituto Geológico (SMA 2006) permitiu individuali-

zar três setores de risco (Figura 7a, Tabela 14). No mapeamento de perigo com a aplicação do método AHP, também foram identificados três setores, a saber (Figura 7b, Tabela 14):

- Setor 1 (corresponde ao setor 1 do mapeamento de risco do IG) – identificou-se as probabilidades de ocorrências de escorregamentos em taludes de corte, encosta natural e aterro. O maior valor do índice de perigo foi de 28,83 e, consequentemente, o grau de perigo médio foi atribuído ao processo de escorregamento em talude de corte. Os indicadores de perigo responsáveis por essa classificação, conforme os julgamentos paritários atribuídos na matriz de decisão AHP, são as excessivas amplitudes e alturas dos taludes de corte e a presença de solo exposto. No mapeamento realizado pelo IG esse setor foi classificado como risco alto;
- Setor 2 (corresponde ao setor 2 do mapeamento de risco do IG) – classificou-se como grau de perigo médio para escorregamentos em taludes de aterro de acordo com os julgamentos da matriz de decisão AHP; entretanto, devido à presença de feições de instabilidade significativas, a classificação final do perigo foi muito alto;
- Setor 3 (corresponde ao setor 3 do mapeamento de risco do IG) – o maior índice de perigo foi 28,43, com grau de perigo médio para escorregamento raso em encostas naturais. O indicador de perigo responsável pela classificação foi a declividade excessiva.

6 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação do método AHP nos procedimentos normalmente utilizados nos mapeamentos de riscos de escorregamentos em encostas urbanas permitiu diminuir a subjetividade destes mapeamentos e melhorar o grau de confiabilidade do diagnóstico de risco para a implementação das ações de mitigação por parte do poder público. Duas importantes características puderam ser constatadas: a flexibilidade e a possibilidade de se verificar a consistência dos julgamentos na análise. A análise de sensibilidade promove maior percepção do julgamento qualitativo dos processos de perigo, aumentando o nível de confiança na tomada de decisão.

TABELA 13 – Resultados da análise de perigo por meio das comparações par a par dos julgamentos da autora deste trabalho e dos três especialistas consultados, na área da Vila Baiana.

Setor	Encosta/ Talude	Processo	Feições de Instabilidade	Mapeamento de perigo com aplicação do método AHP						Especialista 3 Análise de Perigo	Especialista 2 Análise de Perigo	Especialista 3 Análise de Perigo	n° moradias	
				Autora				Especialista 1						
				IP	Grau	Grau final	IP	Grau	Grau final	IP	Grau	Grau final	IP	
A3_S1	Natural	Escorregamento raso de solo	não	18,31	P1-Baixo	18,17	P1-Baixo	22,7	P1-Baixo	23,62	P1-Baixo	23,62	P1-Baixo	
A3_S1	Corte	Escorregamento solo/rocha	não	28,83	P2-Médio	33,54	P2-Médio	38,29	P2-Médio	38,84	P2-Médio	38,84	P2-Médio	40
A3_S1	Aterro	Escorregamento	não	24,15	P1-Baixo	35,02	P2-Médio	32,94	P2-Médio	26,74	P1-Baixo	26,74	P1-Baixo	
A3_S2	Aterro	Escorregamento	trincas no piso e paredes; cicatriz	31,34	P2-Médio	38,75	P2-Médio	39,16	P2-Médio	39,53	P2-Médio	39,53	P2-Médio	
A3_S3	Natural	Escorregamento raso de solo	não	28,43	P2-Médio	24,66	P1-Baixo	35,41	P2-Médio	32,23	P2-Médio	32,23	P2-Médio	
A3_S3	Corte	Escorregamento solo/rocha	não	20,64	P1-Baixo	26,98	P1-Baixo	29,73	P1-Baixo	29,90	P1-Baixo	29,90	P1-Baixo	20

TABELA 14 – Resultados do grau de risco e análise do perigo na Área da Vila Baiana: mapeamento do IG *versus* mapeamento com o método AHP.

Mapeamento de risco IG-SMA							
Setor	Processo adverso	Grau de risco	nº de moradias ameaçadas				
A3_S1	Escorregamento de solo	R3 - Alto	40				
A3_S2	Escorregamento de solo	R4 - Muito Alto	1				
A3_S3	Escorregamento de solo	R2 - Médio	20				
Mapeamento de perigo aplicando o método AHP							
Setor	Encosta/ Talude	Processo	Feições de Instabilidade	Análise de Perigo		nº moradias ameaçadas	
				IP	Grau		
A3_S1	Encosta natural	Esc. raso	não	18,31	P1-Baixo	P2 Médio	40
A3_S1	Talude de corte	Esc. solo/rocha	não	28,83	P2-Médio		
A3_S1	Aterro	Escorregamento.	não	24,15	P1-Baixo		
A3_S2	Aterro	Escorregamento	Trincas no piso e paredes; cicatriz	31,34	P2-Médio	P4 Muito Alto	1
A3_S3	Encosta natural	Esc. raso	não	28,43	P2-Médio	P2 Médio	20
A3_S3	Talude de corte	Esc. solo/rocha	não	20,64	P1-Baixo		

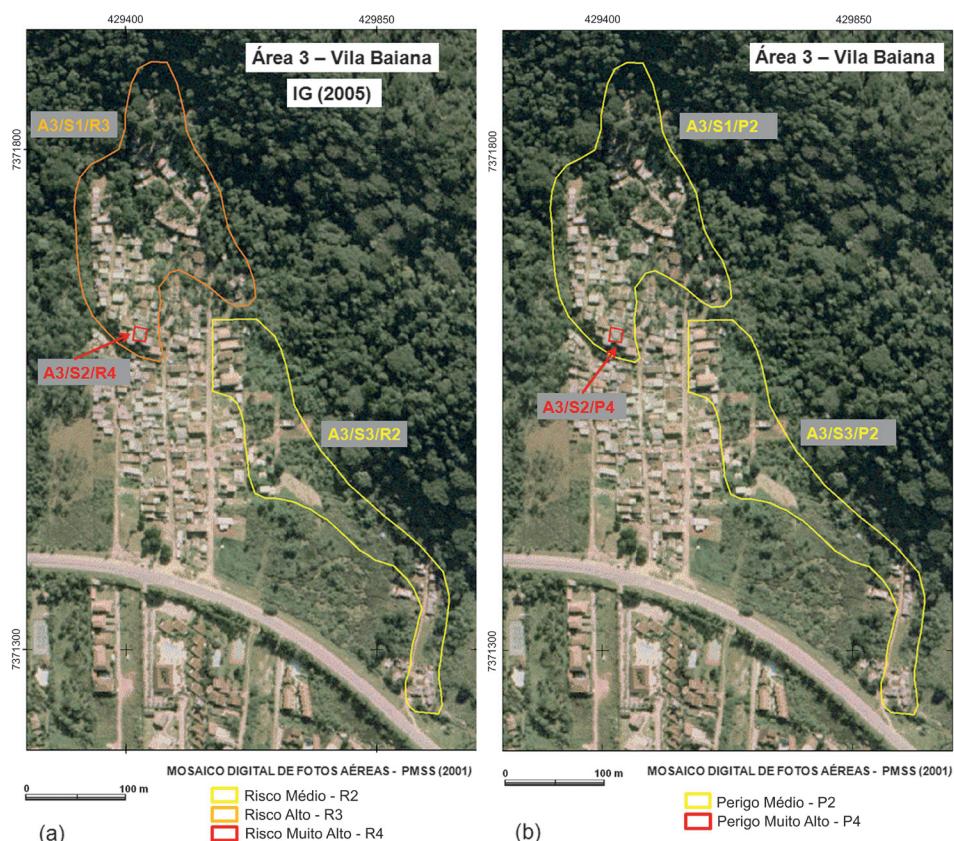


FIGURA 7 – (a) Mapeamento de risco realizado por SMA (2006) e (b) de perigo com a aplicação do método AHP na área da Vila Baiana.

A flexibilidade está associada à facilidade de se adaptar novas estruturações na matriz de decisão, dependendo dos processos e critérios de risco e perigo a serem analisados. Dessa forma, este método pode ser aplicado de forma homogênea em diferentes cenários de perigo.

A estruturação da “análise do perigo” em planilhas do programa *Microsoft Excel* torna o método mais prático, facilmente comprehensível e, ainda, permite uma clara visualização da contribuição dos processos associados a escorregamentos na análise do perigo.

Além disso, a aplicação do método AHP no mapeamento de perigo evidencia a facilidade e praticidade de se verificar a contribuição (em forma de peso) dos indicadores de perigo na classificação dos setores mapeados.

Ao se comparar os resultados do mapeamento de risco IG/SMA (2006) com os de mapeamento do perigo pelo método AHP, observa-se que o último método permite:

- A sistematização e hierarquização dos condicionantes naturais e induzidos dos processos de escorregamentos, minimizando a subjetividade, tornando a análise de perigo mais objetiva e consistente;
- A adoção de procedimentos para uniformizar a delimitação dos setores nas áreas mapeadas.

Nessa comparação constatou-se que houve uma avaliação mais conservadora dos julgamentos na análise do risco efetuada pelo IG, que classificou um dos setores como de “risco alto”, enquanto pelo método AHP o mesmo setor foi classificado como “perigo médio”, tanto pela autora deste trabalho como pelos especialistas consultados.

Assim, com base nesses resultados é possível definir, de forma otimizada, as ações necessárias para a gestão de risco.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAHI, T.; TURO, D.; SHNEIDERMAN, B. 1994. Visual decision-making: Using tree maps for the Analytic Hierarchy Process. University of Maryland, Maryland. Disponível em http://sigchi.org/chi95/Electronic/documents/videos/ta_bdy.htm. Acessado em 21/nov./2008.
- AUGUSTO FILHO, O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: ABMS/ABGE, CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCASTAS, 1, Rio de Janeiro, *Anais*, p. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; AMENOMORI, C. J. 1990. Riscos Geológicos: Aspectos Conceituais. In: ABGE, SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1, São Paulo, *Anais*, p. 334-341.
- BORITZ, J. E. 1992. Pairwise Comparison – The Analytic Hierarchy Process. University of Waterloo, Waterloo. Disponível em: <http://www.Jebel.com/Riskdo3.Htm>. Acessado em 20/Nov./2008.
- CANIL, K.; MACEDO, E.S.; GRAMANI, M.F.; ALMEIDA FILHO, G.S.; YOSHIKAWA, N.K.; MIRANDOLA, F.A.; VIEIRA, B.C.; BAIDA, L.M.A.; AUGUSTO FILHO, O.; SHINOHARA, E.J. 2004. Mapeamento de risco em assentamentos precários nas zonas sul e parte da oeste no Município de São Paulo (SP). In: ABGE, Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 5, São Carlos, *Anais*, p.193-204.
- CARVALHO, C.S.; GALVÃO, T. 2006. Ação de Apoio à Prevenção e Erradicação de Riscos em Assentamentos Precários. In: C. S. Carvalho & T. Galvão (orgs.) Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais. Brasília, Ministério das Cidades, Cities Alliance p. 10-17.
- CERRI, L.E.S. 1993. Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, Tese de Doutorado, 197 p.
- CERRI, L.E.S. 2006. Mapeamento de Riscos nos Municípios. In: C. S. Carvalho & T. Galvão (orgs.) Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais. Brasília, Ministério das Cidades, Cities Alliance, p. 46-55.
- CERRI, L.E.S.; NOGUEIRA, F.R. 2012. Mapeamento e gestão de riscos de escorregamentos: uma proposta metodológica. In: ABMS/ABGE, CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ENCASTAS, 2, Rio de Janeiro, *Anais*, p. 721-733.

- gamentos em áreas de assentamentos precários. In: S.T.L. Guimarães, S. Carpi Jr., M.B.R.B. Godoy (orgs) Gestão de áreas de riscos e desastres ambientais. Rio Claro, IGCE/UNESP, 1ª Edição, p. 285-304.
- CERRI, L.E.S.; ZAINÉ, J.E.; SILVA, V.C.R.; SILVA, L.C.R.; NÉRI, A.C.; BARBOSA, T.T.A.; PAULA, J.P.L.; SCARANCE, M.R.A.P.; SILVA, D.M.B. 2004. Mapeamento de risco em áreas de ocupação precária nas zonas norte, leste e oeste do Município de São Paulo (SP). In: ABGE, Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 5, São Carlos, Anais, p.115-122.
- CERRI, L.E.S.; NOGUEIRA, F. R.; CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; AUGUSTO FILHO, O. 2007. Mapeamento de Risco em assentamentos precários no município de São Paulo (SP). *Geociências*, 26(2):143-150.
- CHOIRAT, C.; SERI, R. 2001. Analytic Hierarchy Process, a Psychometric Approach. Dipartimento di Economia di Università del l'Insubria, Itália. Disponível em: <http://cchoirat.pagesperso-orange.fr/Choirat-Seri-ACSEGPaper-2001-AHP.pdf>. Acessado em 7/abr./2013.
- COELHO, E.C.R.; MACHADO, R.P.P. 2009. O sistema de priorização do HABISP: um estudo de caso. In: EGAL - Encuentro de Geógrafos de América Latina, 12, Montevideo, Uruguay. Disponível em: http://egal2009.easyplanners.info/area05/5136_Correia_Rodrigues_Coelho_Eliene.pdf. Acessado em 8/ago./2013.
- ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S.M. D. 2001. Apoio à decisão. Editora Insular, Florianópolis (SC), 295 p.
- FARIA, D.G.M.; FERREIRA, C.J.; ROSSINI-PENTEADO, D.; FERNANDES DA-SILVA, P.C.; CRIPPS J.C. 2005. Mapeamento de áreas de risco a escorregamentos e inundações em áreas habitacionais de Diadema (SP). In: ABGE, Congresso Brasileiro Geologia de Engenharia e Ambiental, 11, Florianópolis, *Anais*, p. 892-907,CD-ROM.
- FINNIE, G.R.; WITTIG, G.E. 1999. An Intelligent Web Tool for Collection of Comparative Survey Data. School of Information Technology Bond University, Austrália. Disponível em: <http://www.it.bond.edu.au/publications/99TR/99-10.pdf>. Acessado em 21/nov./2008.
- FUNDUNESP - FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA UNESP. 2003. Mapeamento de risco associado a áreas de encosta e margens de córregos nas favelas do Município de São Paulo. UNESP/IGCE/DGA, Rio Claro, 78 p. (Relatório Final).
- KIM, S.C. 1999. Statistical Issues in Combining Expert Opinions for Analytic Hierarchy Process. Soongsil University, Coréia. Disponível em: http://www.stat.fi/isi99/proceedings/arkisto/varasto/kim_0217.pdf. Acessado em 15/abr./2008.
- MACEDO, E.S. 2001. Elaboração de cadastro de risco iminente relacionado a escorregamentos: avaliação considerando experiência profissional, formação acadêmica e subjetividade. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, Tese de Doutorado, 276 p.
- MACEDO, E.S.; CANIL, K.; GRAMANI, M.F.; ALMEIDA FILHO, G.S.; YOSHIKAWA, N.K.; MIRANDOLA, F.A.; VIEIRA, B.C.; BAIDA, L.M.A.; AUGUSTO FILHO, O.; SHINOHARA, E.J. 2004a. Mapeamento de áreas de risco de escorregamentos e solapamento de margens no município de São Paulo - SP: o exemplo da Favela Serra Pelada, Subprefeitura Butantã. In: GEDN/UFSC, Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1, Florianópolis, *Anais*, p. 59-72, CD-ROM.
- MACEDO, E.S.; OGURA, A.T.; CANIL, K.; ALMEIDA FILHO, G.S.; GRAMANI, M.F.; SILVA, F.C.; CORSI, A.C.; MIRANDOLA, F.A. 2004b. Modelos de fichas descritivas para áreas de risco de escorregamento, inundaçao e erosão. In: GEDN/UFSC, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1, Florianópolis, *Anais*, p. 892-907, CD-ROM.

- NOGUEIRA, F.R. 2006. Gestão dos Riscos nos Municípios. In: C.S. Carvalho & T. Galvão (orgs.) Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais. Brasília, Ministério das Cidades, Cities Alliance, p. 26-45.
- PAMPLONA, E. de O. 1999. Avaliação qualitativa de cost drivers pelo método AHP. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá. Disponível em: <http://www.iem.efe.br/edson/download/Artavalahp.pdf>. Acessado em 8/nov./2009.
- SAATY, T.L. 1980. The Analytic Hierarchy Process. McGraw Hill, New York.
- SAATY, T.L. 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48: 9-26.
- SAATY, T.L. 2008. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process. Madrid: Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics. Disponível em: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00576.pdf>. Acessado em 31/jul./2013.
- SANTORO, J.; ROSSINI-PENTEADO, D.; VEDOVELLO, R. 2005. Hierarquização das situações de riscos associados a escorregamentos e inundações no município de Rio Grande da Serra, SP: subsídios para o planejamento de ações preventivas e emergenciais. In: ABGE, Congresso Brasileiro Geologia de Engenharia e Ambiental, 11, Florianópolis, *Anais*, p. 866-878, CD-ROM.
- SAUNDERS, J.H. 1994. Comparison of Decision Accuracy in the Analytic Hierarchy Process and Point Allocation. Washington. Disponível em: <http://www.johnsaunders.com/papers/ahpvpa/ahpvpa.htm>. Acessado em 21/nov./2008.
- SCHMIDT, A.M.A. 1995. Processo de apoio à tomada de decisão - Abordagens: AHP e MACBETH. UFSC, Florianópolis, Dissertação de Mestrado. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta/engait95.html>. Acessado em 20/nov./2008.
- SMA – SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. 1996. Carta de Risco a Movimentos de Massa e Inundação do Município de São Sebastião, SP. IG/SMA, São Paulo. 1 v. e Anexos (15 mapas), 77 p. (Relatório Técnico do Instituto Geológico)
- SMA – SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. 2006. Mapeamento de Risco a escorregamentos e inundações do município de São Sebastião, SP. IG/SMA, São Paulo, 1 v.e anexos, 302 p. (Relatório Técnico do Instituto Geológico).
- TEKNOMO, K. 2006. Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial. Disponível em: <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/ahp>. Acessado em 7/ago./2009.
- TOMA, T.; ASHARIF, M.R. 2003. AHP coefficients optimization technique based on GA. Department of Information Engineering of University of Ryukyus, Japan. Disponível em: <http://bw-www.ie.u-ryukyu.ac.jp/~j94033/study/finalpaper2.html>. Acessado em 20/nov./2008.
- TRENTIM, M. 2012. Tomada de decisão em projetos – método AHP. Disponível em: <http://blog.mundopm.com.br/2012/05/02/tomada-de-decisao-em-projetos-%e2%80%93-metodo-ahp>. Acessado em 14/fev./2013.
- UNDRO – UNITED NATIONS DISASTER RELIEF OFFICE. 1991. UNDRO's approach to disaster mitigation. Geneva: Office of the United Nations Disasters Relief Coordinator, 20 p. (UNDRO News, jan.-febr.).
- YOSHIKAWA, N.K. 1997. Nova Metodologia de Avaliação de Encostas Rochosas. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 268 p.

Endereço dos autores:

Daniela Gírio Marchiori Faria - Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Avenida Miguel Stéfano, 3900, CEP: 04301-903, Água Funda, São Paulo, SP. *E-mail:* dgmfaria@uol.com.br

Oswaldo Augusto Filho - Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador Sãocarlense, 400, CEP: 13566 -590, São Carlos, SP. *E-mail:* oafilho@sc.usp.br

Artigo submetido em 31 de julho de 2013, aceito em 10 de outubro de 2013.