**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

CAMILA NATÁLIA RAMOS DE ALMEIDA

**Estudo geoambiental da região da Serra da Canastra - MG: potencialidades e restrições
ao uso turístico**

São Carlos - SP

2014

CAMILA NATÁLIA RAMOS DE ALMEIDA

**Estudo geoambiental da região da Serra da Canastra - MG: potencialidades e restrições
ao uso turístico**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Titular Osni José Pejon

VERSÃO CORRIGIDA
Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos - SP

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A447e Almeida, Camila Natália Ramos de
Estudo geoambiental da região da Serra da Canastra
- MG : potencialidades e restrições ao uso turístico /
Camila Natália Ramos de Almeida; orientador Osni José
Pejon. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Ecoturismo. 2. Suscetibilidade. 3. Restrição. 4.
Sensoriamento remoto. 5. Geoprocessamento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharel **CAMILA NATÁLIA RAMOS DE ALMEIDA.**

Título da dissertação: "Estudo geoambiental da região da Serra da Canastra – MG: potencialidades e restrições ao uso turístico".

Data da defesa: 27/06/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Osni José Pejon (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Oswaldo Augusto Filho**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

aprovado

Prof. Dr. **Luiz Nishiyama**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*Dedico este trabalho
aos meus pais, Rosângela e Salvador,
meus exemplos de vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que iluminou meu caminho durante esta caminhada.

Ao professor Osni, pela dedicação, paciência, amizade e enorme contribuição para o meu crescimento profissional.

Ao professor Collares, meu orientador durante a iniciação científica. Graças ao seu apoio e amizade pude chegar até aqui. Obrigada pela confiança.

Aos técnicos e funcionários do departamento, por todo carinho e atenção que sempre tiveram.

Ao Projeto Grande Minas e toda a sua equipe, pela disponibilização de produtos indispensáveis para esta pesquisa.

A todos os professores do Departamento de geotecnia, pelos inúmeros ensinamentos durante o mestrado.

Aos professores, João Brandão e Valéria, pelas oportunidades de realização dos estágios em docência do ensino superior.

À CEMIG, especialmente ao Sr. Carlos Eduardo, por tudo carinho que me recebeu em Belo Horizonte-MG e pelo empréstimo das fotografias aéreas.

À funcionária do Parque Nacional Serra da Canastra, Paola Ribeiro, pela disponibilização de dados importantes para esta pesquisa.

Ao professor Luiz Sergio Simões, UNESP/Rio Claro, pela atenção e empréstimo das fotografias aéreas.

Aos meus pais e irmã, que com muito carinho e apoio não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Ao meu namorado, Danillo, pelo apoio e companheirismo sempre.

Aos meus queridos amigos da geotecnia, atuais e antigos, por terem tornado esta caminhada muito mais alegre: Amandinha, Bianca, Bruno, Camila Fiote, Cláudinha, Isa, Ju, Lili, Lucas, Maria Paula, Moises, Princesa Ynê, Rômulo e Thalita.

A CAPES, pela bolsa concedida e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

*"O futuro não é um lugar onde estamos
indo, mas um lugar que estamos criando.
O caminho para ele não é encontrado, mas construído
e o ato de fazê-lo muda tanto o realizador quando o destino."*

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

ALMEIDA, C. N. R. Estudo geoambiental da região da Serra da Canastra - MG: potencialidades e restrições ao uso turístico. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Este trabalho teve como objetivo avaliar as restrições e potencialidades ao uso turístico de parte da área do Parque Nacional Serra da Canastra (MG), na escala 1:50.000. Analisou-se a evolução temporal do uso e ocupação do solo e os impactos negativos ocasionados ao meio físico pela localização inadequada das vias de acesso. Por meio de técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e trabalhos de campo foram mapeadas as vias de acesso, delimitadas bacias hidrográficas com ordens hierárquicas iguais ou superiores a dois, realizadas análises de densidade de vias de acesso e canais de drenagem e elaborados produtos cartográficos básicos (modelo digital de elevação hidrologicamente consistente, carta de declividade, carta de distância vertical da drenagem mais próxima e mapas de uso e ocupação do solo de 1964/1967, 1989 e 2009). Estes resultados foram combinados a trabalhos de outros autores para elaboração dos seguintes documentos interpretativos: carta de restrição à implantação de vias, carta de predisposição a movimentos de massa, carta de suscetibilidade à inundação de planícies, carta de suscetibilidade à ocorrência de incêndios e carta de trafegabilidade. Com base nestes documentos interpretativos, foram obtidos os níveis de suscetibilidades e restrições das bacias hidrográficas mapeadas. A partir de critérios de classificação, foram adotadas cinco classes de adequabilidade ao uso turístico. De modo geral, as bacias hidrográficas mostraram-se bastante restritivas a este uso, 81% foram classificadas como semi-adequadas ou inadequadas e apenas 19% como adequadas. Não foram identificadas bacias que se enquadravam como totalmente adequadas ou totalmente inadequadas. Apesar de prevalecerem condições de restrição ao uso turístico da área de estudo, estas não necessariamente inviabilizam a sua utilização para o turismo. A partir dos documentos interpretativos, que apresentam suscetibilidades e restrições, o uso turístico da área pode ser melhor planejado, de maneira a reduzir impactos e riscos.

Em relação à evolução temporal do uso e ocupação do solo na área de estudo, o mapeamento mostrou que não ocorreram grandes mudanças ao longo dos períodos analisados, contudo houve uma pequena melhora na preservação das formações florestais. As vias de acesso também não apresentaram um aumento significativo no período compreendido entre 1989 e 2009. Quanto aos impactos negativos causados ao meio físico,

as rodovias de tráfego periódico mostraram-se mais preocupantes quanto ao desenvolvimento de processos erosivos que os caminhos/trilhas, devido a sua localização sobre materiais inconsolidados mais suscetíveis à erosão. No entanto, os caminhos/trilhas podem ser deflagradores de outros impactos pela concentração do escoamento superficial, como assoreamento dos corpos d'água, aumento da turbidez e vazão dos rios.

Palavras chave: Ecoturismo, Suscetibilidade, Restrição, Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento.

ABSTRACT

ALMEIDA, C. N. R. Geoenvironmental study of Serra da Canastra region - MG: potentialities and restrictions regarding the touristic use. 2014. Dissertation (Master in Geotechnical) - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, 2014.

This study had the objective of evaluating the potentialities and restrictions regarding the touristic use of Serra da Canastra region (MG), in scale 1:50.000. The temporal evolution and soil occupation were analyzed as well as the negative impacts caused to the environment due to improper location of the access roads. The access roads were mapped through remote sensing, geoprocessing and field work, the hydrographic Basins were delimited with hierarchical order equal or higher than second hierarchical order, access road and drain canal density analysis was performed, and basic cartographic products were done (digital model of hydrologically consistent elevation, slope map, vertical distance of the nearest drain and the soil use and occupation in 1964/1967, 1989 and 2009). These results were combined on the study of other authors in order to have the following interpretative documents: restriction map to the road implementation, mass movement predisposition map, susceptibility to floodplains map, susceptibility to fire map, and trafficability map. Based on those interpretative documents, susceptibility and restriction levels were obtained to the mapped watersheds. These levels were used to define the criteria for classification of the watersheds in five classes of suitability for the tourist use. In general, the watersheds showed very restrictive to this use, 81% were classified as semi-suitable or unsuitable and only 19% as suitable. No watershed was considered completely suitable or unsuitable. Although conditions to restriction regarding the touristic use of the study area remain, those do not necessarily stop its use to the tourism. From the intermediate products, which present susceptibility and restrictions, the touristic use of the area can be better planned, in such a way to reduce impacts and risks. Regarding the temporal evolution of the soil use and occupation in the study area, the mapping has shown that big changes along the analyzed periods have not occurred, however there was a small improvement when it comes to preserving the forest formation. The road access did not present a significant increase between 1989 and 2009 either. Regarding the negative impacts caused to the environment, the traffic roads presented as more worrying about the development of erosive processes than the paths, due to its location on more susceptible to erosion unconsolidated materials. However, the paths may trigger other impacts because of the concentration of superficial flowing, such as drainage channels silting, increase of turbidity and river discharge.

Keywords: Ecotourism, Susceptibility, Restriction, Remote sensing, Geoprocessing

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre geoturismo e ecoturismo com os outros segmentos do turismo. Fonte: Newsome e Dowling (2010).....	38
Figura 2 - Esquema representativo das inter-relações que estabelecem os conceitos de geodiversidade, geossítios, patrimônio geológico, geoconservação e geoturismo. Fonte: Modificado de Araújo (2005).....	42
Figura 3- Mapa de locação das áreas propostas para a criação de geoparques no Brasil pelo Projeto Geoparques do CPRM. Fonte: Schobbenhaus (2006).....	45
Figura 4 - Efeito da densidade de vias sobre a densidade de drenagem e da rede de vias sobre o número de cruzamentos vias/drenagem na paisagem (JONES et al., 2000).	48
Figura 5 - Diagrama das metodologias disponíveis para o cálculo de vazões de cheia. Fonte: Modificado de DAEE (2005).	67
Figura 6 - Arquitetura de saídas e entradas típicas de um SIG atual. Fonte: Eastman (1992).	70
Figura 7 - Espectro eletromagnético captado pelas técnicas de sensoriamento remoto. Fonte: Augusto Filho (2012).	72
Figura 8 - (a) Exemplo de sensor passivo; (b) Exemplo de sensor ativo.	73
Figura 9 - Estrutura de uma imagem digital multiespectral.	74
Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo.	81
Figura 11 - Localização da área de estudo e principais vias de acesso pela região sudeste.	82
Figura 12 - Mapeamento da cobertura vegetal referente a 2009. Fonte: Scolforo, Oliveira e Carvalho (2014).....	83
Figura 13 - Localização da área de estudo em relação às bacias hidrográficas federais e unidades de planejamento de Minas Gerais.	85
Figura 14 - Mapa de substrato rochoso da área de estudo. Fonte: Modificado de Gomes e Collares (2010a).	86
Figura 15 - Croqui da relação rocha x relevo na região. Fonte: Pessoa (2002) apud IBAMA (2005).	87
Figura 16 - Mapa de landforms. Fonte: Modificado de Magri (2013).	87
Figura 17 - Mapa de materiais inconsolidados. Fonte: Modificado de Magri (2013).	88
Figura 18 - Fluxograma envolvendo as etapas adotadas no desenvolvimento desta pesquisa.	94
Figura 19 - Base topográfica da área de estudo.	95
Figura 20 - Mosaico de fotografias aéreas.	96

Figura 21 - Mosaico de ortofotocartas.....	97
Figura 22 - Exemplo da diferença de contraste em alvos iguais nas ortofotocartas de 1989.	101
Figura 23 - Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo.	102
Figura 24 - Tela de definição do Scale Level.....	103
Figura 25 - Tela de definição do Level Merge.	104
Figura 26 - Tela de definição das regras de classificação.	105
Figura 27 - Procedimentos para correção de modelo digital de elevação por meio de ferramentas disponíveis na rotina HAND. Fonte: Adaptado de Nobre et al. (2011).	108
Figura 28 - Esquema ilustrativo de cálculo de densidade de pontos pela ferramenta Kernel Density.	109
Figura 29 - Exemplo de localização das confluências entre rodovias de tráfego periódico e canais de drenagem de 1º ordem.	110
Figura 30 - Procedimentos para geração e fatiamento do modelo HAND. Fonte: Adaptado de Nobre et al. (2011).	116
Figura 31 - Coeficiente de distribuição espacial da chuva (U. S. Weather Bureau, 1979 modificado por Prefeitura de São Paulo, 1999).	122
Figura 32 - Transformação das curvas intensidade (i) x duração (t) em retas por anamorfose utilizando t+20. Fonte: Vieira, Lombard e Santos (1998).	126
Figura 33 - Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente.	136
Figura 34 - Percentual de abrangência das classes hipsometricas na área de estudo.	137
Figura 35 - Percentual de abrangência das classes de declividade na área de estudo.	137
Figura 36 - Carta de declividade da área de estudo.	138
Figura 37 - Distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo (2009) na área de estudo.	139
Figura 38 - Mapa de uso e ocupação do solo. Fonte: Modificado de Dias (2013a)	142
Figura 39 - Comparação da distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo em 1989 e 2009.	143
Figura 40 - Mapa de uso e ocupação do solo referente ao ano de 1989.	144
Figura 41 - Comparação da distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo em 1964/1967, 1989 e 2009.	145
Figura 42 - Mapa de uso e ocupação do solo referente ao período 1964-1967.	146
Figura 43 - Vias de acesso referentes ao ano de 1989 sobre as ortofotocartas..	149
Figura 44 - Vias de acesso referentes ao ano de 2009 sobre as imagens de satélite.	150

Figura 45 - Padrões de vias de acesso em diferentes condições topográficas. (a) Caminho/trilha em relevo plano; (b) Caminho/trilha sobre relevo acidentado (serra); (c) Vista geral de caminho/trilha sobre relevo acidentado; (d) Rodovia de tráfego periódico sobre platô; (e) Rodovia de tráfego periódico em topografia fortemente inclinada; (f) Rodovia de tráfego periódico em relevo suavemente colinoso.	152
Figura 46 - Sulco em leito abandonado de caminhos/trilhas ao lado do leito atual.	153
Figura 47 - Processos erosivos em rodovia de tráfego periódico. (a) Vista geral dos processos erosivos em trecho da serra Branca; (b) Material inconsolidado siltoso bastante espesso constituinte da área; (c) Ravina 3 no leito da rodovia de tráfego periódico; (d) Ravina 1 nas proximidades de caminho/trilha, antiga rodovia de tráfego periódico.	154
Figura 48 - Matriz AHP para classes de textura dos níveis dos perfis de alteração (período seco).	156
Figura 49 - Matriz AHP para classes de textura (período úmido).	158
Figura 50 - Matriz AHP para nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo (período seco).	159
Figura 51 - Matriz AHP para nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo (período úmido).	160
Figura 52 - Matriz AHP para unidades geológicas (período seco).	162
Figura 53 - Matriz AHP para unidades geológicas (período úmido).	162
Figura 54 - Matriz AHP para classes de declividade (período seco).	163
Figura 55 - Matriz AHP para classes de declividade (período úmido).	164
Figura 56 - Matriz AHP para atributos considerados influentes na trafegabilidade (período seco).	165
Figura 57 - Matriz AHP para atributos considerados influentes na trafegabilidade (período úmido).	165
Figura 58 - Carta de trafegabilidade do período úmido.	167
Figura 59 - Carta de trafegabilidade do período seco.	168
Figura 60 - Percentual da área de estudo ocupado pelas classes de trafegabilidade no período úmido e seco.	169
Figura 61 - Comparação percentual da extensão das rodovias de tráfego sobre as diferentes classes das cartas de trafegabilidade para o período seco e úmido.	170
Figura 62 - Trecho de rodovia de tráfego periódico (Serra Calçada) localizada em terreno pouco trafegável.	170
Figura 63 - Espacialização da densidade de vias totais, caminhos/trilhas e rodovias de tráfego periódico na área de estudo.	172
Figura 64 - Frequência de canais de drenagem na área de estudo.	174

Figura 65 - Espacialização das confluências entre vias de acesso e canais de drenagem.	177
Figura 66 - Distribuição percentual do número de confluências por ordens de canais de drenagem.....	178
Figura 67 - Número de confluência por km de via de acesso, total e por ordens de canais de drenagem.....	178
Figura 68 - Densidade de confluências entre canais de drenagem totais e vias de acesso totais.....	180
Figura 69- Densidade de confluências entre rodovias de tráfego periódico e canais de drenagem por ordem hierárquica.	181
Figura 70 - Densidade de confluências entre caminhos/trilhas e canais de drenagem por ordem hierárquica.	182
Figura 71 - Carta de restrição à implantação de vias.	184
Figura 72 - Faixas de proximidade a partir dos canais de drenagem por ordem hierárquica.	186
Figura 73 - Extensão percentual das vias de acesso inseridas em faixas de proximidade dos canais de drenagem.....	187
Figura 74 - Extensão percentual das vias de acesso inseridas em faixas de proximidade dos canais de drenagem por ordem hierárquica dos canais.....	187
Figura 75 - Percentual de feições erosivas localizados nas faixas de distância a partir das vias de acesso.....	190
Figura 76 - Erosão em rodovia de tráfego periódico no vale da Bateia. (a) Vista da rodovia de tráfego periódico próximo à boçoroca com localização da calha de drenagem da via; (b) Escoamento superficial da calha de drenagem direcionado para a boçoroca.	190
Figura 77 - Carta de distância vertical da drenagem mais próxima da área de estudo. ...	193
Figura 78 - Matriz AHP dos parâmetros morfométricos influentes na suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies.....	195
Figura 79 - Carta de suscetibilidade morfométrica das bacias hidrográficas à inundação de planícies.	196
Figura 80 - Matriz AHP dos atributos considerados influentes sobre a suscetibilidade à inundação de planícies.	198
Figura 81 - Carta de suscetibilidade à inundação de planícies.	200
Figura 82 - Espacialização das cachoeiras e suas áreas de contribuição.	202
Figura 83 - Matriz AHP dos parâmetros morfométricos considerados influentes sobre a suscetibilidade morfométrica à cheias relâmpago.	204
Figura 84 - Curvas de intensidade-duração-frequência da área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido.	208

Figura 85 - Tentativa de anamorfose do trecho curvilíneo da curva intensidade x duração para o período de retorno igual a 2 anos. (a) $t + 10$; (b) $t + 13$; (c) $t + 9$; (d) $t + 11$; (e) $t + 12$.	210
Figura 86 - Transformação das curvas intensidade (i) - duração (t) - frequência (TR) em retas por anamorfose utilizando $t+11$.	211
Figura 87 - Intensidade da chuva em diferentes períodos de retorno (probabilidades de ocorrência) para a área de contribuição das cachoeiras.	216
Figura 88 - Vazão de cheia calculada para as cachoeiras em um período de retorno de 5, 10 e 50 anos.	218
Figura 89 - Critérios adotados para determinação da suscetibilidade hidrológica.	220
Figura 90 - Critérios adotados para determinação da suscetibilidade às cheias relâmpago pela combinação da suscetibilidade hidrológica e morfométrica.	221
Figura 91 - Número mensal de focos de incêndios no período 2004/2013. Fonte: INPE (2013).	223
Figura 92 - Cartas de susceptibilidade à ocorrência de incêndios.	225
Figura 93 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidades a incêndios das cartas mensais da área de estudo.	226
Figura 94 - Número percentual dos focos de incêndios nas classes das cartas de suscetibilidade à ocorrência de incêndios.	227
Figura 95 - Carta de predisposição a movimentos de massa sobreposta ao MDE sombreado.	228
Figura 96 - Blocos instáveis ao longo do leito do rio formado por taludes rochosos.	229
Figura 97 - Trecho da trilha de acesso às cachoeiras com blocos rochosos sujeitos a escorregamento.	230
Figura 98 - Tombamento em talude de corte.	231
Figura 99 - Rolamento de blocos rochosos próximos à rodovia de tráfego periódico.	232
Figura 100 - Talude de corte em depósito de tálus.	233
Figura 101 - Vista transversal do talude evidenciando pequenos escorregamentos.	233
Figura 102 - Rodovia de tráfego periódico próxima a talude com blocos instáveis ao tombamento e à queda.	234
Figura 103 - Instabilidade de blocos rochosos no vale da Bateia.	235
Figura 104 - Instabilidade de blocos rochosos no Condomínio das Pedras.	235
Figura 105 - Classificação das bacias hidrográficas em relação às suas suscetibilidades e restrições analisadas.	239
Figura 106 - Chave de codificação das bacias hidrográficas em relação às suas suscetibilidades e restrições analisadas.	237

Figura 107 - Carta de potencialidades e restrições das bacias hidrográficas ao uso turístico.....241

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de escoamento superficial volumétrico c_2 do método I-Pai-Wu modificado.	121
Tabela 2 - Constantes do modelo de desagregação de chuvas diárias.....	125
Tabela 3- Escala fundamental de Saaty.....	130
Tabela 4 - Índice de Consistência Random.	131
Tabela 5 - Extensão e distribuição percentual das vias de acesso em 1989 e 2009.	147
Tabela 6 - Agrupamento das texturas dos níveis dos perfis de alteração das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período seco).	156
Tabela 7 - Agrupamento das texturas dos níveis dos perfis de alteração das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período úmido).	157
Tabela 8 - Agrupamento em classes dos níveis predominantes do perfil de alteração/ espessura do solo das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período seco).	159
Tabela 9 - Agrupamento em classes dos níveis predominantes do perfil de alteração/ espessura do solo das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período úmido).	160
Tabela 10 - Agrupamento das unidades geológicas quanto à trafegabilidade (período seco).	161
Tabela 11 - Quantificação percentual da densidade de frequência de canais.	175
Tabela 12 - Percentual de área ocupada por diferentes classes de densidade de confluências.....	179
Tabela 13 - Faixas de proximidades a partir dos canais de drenagem e distribuição percentual destas faixas na área de estudo.....	185
Tabela 14 - Percentagem de extensão dos tipos de vias de acesso localizadas em faixas de proximidades dos canais de drenagem por ordem hierárquica.	188
Tabela 15 - Número de bacias hidrográficas por ordem hierárquica.	191
Tabela 16 - Percentual de área ocupado pelas faixas de distância do modelo HAND.	192
Tabela 17 - Percentual de área ocupada pelas classes de suscetibilidade dos baixos topográficos à inundação.	199
Tabela 18 - Alturas pluviométricas máximas médias (mm/dia) em diferentes períodos de retorno na área de contribuição das cachoeiras.....	206

Tabela 19 - Alturas pluviométricas máximas médias (mm/dia) para durações e períodos de retorno selecionados obtidas por meio da desagregação da chuva de 1 dia na área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido.	207
Tabela 20 - Intensidades máximas médias (mm/h) para durações e períodos de retorno selecionados obtidas por meio da desagregação da chuva de 1 dia na área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido.	208
Tabela 21 - Possíveis valores do parâmetro b adicionados à duração (t) para anamorfose do trecho curvilíneo da curva referente ao período de retorno 2 anos.	209
Tabela 22 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 2 anos.	212
Tabela 23 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 10 anos.	212
Tabela 24 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 25 anos.	213
Tabela 25 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 50 anos.	213
Tabela 26 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 100 anos.	214
Tabela 27 - Parâmetros a e k calculados a partir dos coeficientes lineares das retas linearizadas para Tr 2, 10, 25, 50 e 100 anos.	214
Tabela 28 - Parâmetros das equações i-d-f calculados para as áreas de contribuição das cachoeiras.	215
Tabela 29 - Tempo de concentração das áreas de contribuição das cachoeiras.	217
Tabela 30 - Vazão de cheia calculada para as cachoeiras em um período de retorno de 5, 10 e 50 anos.	217
Tabela 31- Pesos dos atributos e suas respectivas classes quanto à influência sobre a suscetibilidade a incêndios.	224
Tabela 32 - Distribuição percentual das bacias hidrográficas em relação as suas potencialidades e limitações ao uso turístico.	238

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Informações fundamentais para o planejamento. Fonte: Zuquette (1991) (Continua).	57
Quadro 2 - Parâmetros morfométricos e sua relação com as características hidrológicas das bacias de drenagem e eventos de inundação. Fonte: Modificado de Souza (2005) (Continua).	64
Quadro 3 - Parâmetros morfométricos e sua relação com as características hidrológicas das bacias de drenagem e eventos de inundação. Fonte: Modificado de Souza (2005) (Conclusão).	65
Quadro 4 - Vantagens e desvantagens do SIG. Fonte: BELL (2007).	70
Quadro 5 -Tipos de uso e ocupação do solo levantados na área de estudo (continua).	99
Quadro 6 - Fórmulas utilizadas para obtenção dos parâmetros morfométricos.	117
Quadro 7 - Tipos de distribuição de dados e melhores métodos de classificação. Fonte: Esri (2014b). (continua)	133
Quadro 8 - Parâmetros morfométricos considerados influentes sobre o desenvolvimento de inundação em planícies.	194
Quadro 9 - Intervalos das classes de potencial ao escoamento e pluviosidade adotados na classificação da suscetibilidade à inundação de planícies.	198
Quadro 10 - Parâmetros morfométricos considerados influentes sobre o desenvolvimento de cheias relâmpago.	203
Quadro 11 - Classificação da suscetibilidade morfométrica das áreas de contribuição das cachoeiras.	205
Quadro 12 - Intervalos de tempo de concentração e vazão de cheia adotados na classificação da suscetibilidade hidrológica.	219
Quadro 13 - Suscetibilidade hidrológica apresentada pelos valores de tempo de concentração e vazão de cheia.	219
Quadro 14 - Suscetibilidade hidrológica das cachoeiras.	220
Quadro 15 - Suscetibilidade às cheias relâmpago nas cachoeiras mapeadas na área de estudo.	222

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP - Analytic Hierarchy Process

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

EGN - European Geoparks Networks

EMBRATUR - Instituto Brasileiro de Turismo

GD7 - Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Médio rio Grande

GGN - Global Geoparks Network

GPS - Global Positioning System

HAND - Height Above the Nearest Drainage

IAEG - International Association of Engineering Geology and Environmental

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IGCP - Conselho Científico do Programa Internacional de Geociências

IGU - União Geográfica Internacional

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

IUCN - International Union for Conservation of Nature

IUGS - International Union of Geological Sciences

IUGS - União Internacional das Ciências Geológicas

MDEHC - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

OMT - Organização Mundial de Turismo

PNSC - Parque Nacional Serra da Canastra

PUCE- Pattern Unit Component Evaluation

SIGEP - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos

SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza

TCN - The Nature Conservancy

TIES - The International Ecotourism Society

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a educação, a ciência e a cultura

UNWTO - World Tourism Organization

USAF - United States Air Force

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	31
1 Objetivos	33
2 Justificativa	34
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1 Aspectos fundamentais sobre ecoturismo e geoturismo	35
2.1.1 Conceitos e origens	35
2.1.2 Ecoturismo: conservação do patrimônio natural.....	39
2.1.2.1 Ecoturismo no contexto mundial e brasileiro	39
2.1.3 Geoturismo: geoconservação do patrimônio geológico	42
2.1.3.1 Panorama do geoturismo no mundo e no Brasil	43
2.2 Vias de acesso em áreas naturais protegidas de uso ecoturístico.....	47
2.2.1 Impactos	47
2.2.2 Estudos para planejamento e monitoramento de vias de acesso.....	49
2.2.3 Trafegabilidade	50
2.3 Mapeamento geotécnico e geoambiental	50
2.3.1 Principais metodologias internacionais e nacionais	52
2.3.2 Principais tipos de documentos cartográficos gerados.....	55
2.3.3 Principais atributos geológico-geotécnicos	56
2.4 Processos ambientais	58
2.4.1 Processos erosivos e Movimentos de massa.....	59
2.4.2 Incêndios.....	60
2.4.3 Inundação.....	62
2.4.3.1 Características das precipitações.....	62
2.4.3.2 Características morfométricas de bacias hidrográficas.....	64
2.4.3.3 Métodos para a estimativa da vazão de cheia	66
2.5 Ferramentas auxiliares no estudo de processos ambientais	68
2.5.1 Geoprocessamento	68
2.5.1.1 Sistema de Informação Geográfica	69
2.5.2 Sensoriamento Remoto	72
2.5.2.1 Produtos utilizados para obtenção de informações remotas	74
2.5.2.2 Obtenção de informações a partir de imagens de satélite, fotografias aéreas e ortofotocartas.....	77
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	81
3.1 Socioeconomia	82

3.2 Vegetação.....	83
3.3 Clima.....	84
3.4 Recursos hídricos.....	84
3.5 Geologia e geomorfologia.....	86
3.6 Materiais inconsolidados	88
4 MATERIAIS E MÉTODOS	91
4.1 Materiais	91
4.2 Aspectos metodológicos.....	93
4.2.1 Elaboração da base cartográfica: georreferenciamento e mosaicagem	95
4.2.1.1 Cartas topográficas	95
4.2.1.2 Fotografias aéreas	95
4.2.1.3 Ortofotocartas.....	97
4.2.2 Levantamentos básicos	98
4.2.2.1 Vias de acesso	98
4.2.2.2 Pontos de interesse turístico	98
4.2.3 Elaboração de produtos cartográficos básicos	99
4.2.3.1 Mapa de uso e ocupação do solo.....	99
4.2.3.2 Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) e Carta de Declividade	106
4.2.3.3 Análises de densidade e distância	109
4.2.4 Documentos interpretativos	111
4.2.4.1 Carta de restrição à implantação de vias.....	111
4.2.4.2 Carta de predisposição a movimentos de massa	112
4.2.4.3 Carta de trafegabilidade.....	112
4.2.4.4 Cartas de suscetibilidade a incêndios.....	113
4.2.4.5 Suscetibilidade à inundação.....	114
4.2.4.6 Carta de potencialidades e restrições ao uso turístico	128
4.2.5 Método de atribuição de pesos e combinação de produtos temáticos.....	129
4.2.6 Métodos de classificação dos mapas.....	132
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	135
5.1 Mapa de documentação	135
5.2 Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente e Carta de Declividade	135
5.3 Mapas de uso e ocupação do solo	139
5.4 Avaliação das vias de acesso	147
5.4.1 Levantamento das vias de acesso e análise temporal.....	147
5.4.2 Diagnóstico das vias de acesso atuais	151

5.4.3 Carta de trafegabilidade	154
5.4.4 Análises de densidade	171
5.4.4.1 Densidade de vias de acesso.....	171
5.4.4.2 Frequência de canais de drenagem	172
5.4.4.3 Densidade de confluências	176
5.4.5 Carta de restrição à implantação de vias	183
5.4.6 Análises de distância.....	185
5.4.6.1 Distância a partir dos canais de drenagem	185
5.4.6.2 Distância de feições erosivas.....	189
5.5 Suscetibilidade à inundação de planícies	191
5.5.1 Compartimentação da área de estudo	191
5.5.2 Carta de distância vertical da drenagem mais próxima	191
5.5.3 Carta de suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies.....	194
5.5.4 Avaliação final da suscetibilidade à inundação de planícies	197
5.6.1 Suscetibilidade morfométrica às cheias relâmpago	203
5.6.2 Equações i-d-f.....	205
5.6.2.1 Obtenção das alturas pluviométricas máximas em diferentes períodos de retorno	205
5.6.2.2 Desagregação da chuva de 1 dia	207
5.6.2.3 Parâmetros da equação i-d-f	209
5.6.3 Suscetibilidade hidrológica.....	216
5.6.4 Análise integrada das suscetibilidades	221
5.7 Carta de suscetibilidade a incêndios	222
5.8 Carta de predisposição a movimentos de massa	227
5.8.1 Descrição dos pontos de movimentos de massa.....	229
5.8.1.1 Ponto-a	229
5.8.1.2 Ponto-b	230
5.8.1.3 Ponto-c	231
5.8.1.4 Ponto-d	232
5.8.1.5 Ponto-e	233
5.8.1.6 Ponto-f.....	234
5.8.1.7 Ponto-g	235
5.9 Carta de potencialidades e restrições ao uso turístico	236
6 CONCLUSÕES.....	243
6.1 Metodologia/métodos utilizados.....	243
6.2 Produtos obtidos	244

6.3 Estudos futuros	246
REFERÊNCIAS	247
APÊNDICE A - MAPA DE DOCUMENTAÇÃO	263
APÊNDICE B - CARTA DE DECLIVIDADE	265
APÊNDICE C - MAPA DE COBERTURA DO SOLO REFERENTE A 2009.	267
APÊNDICE D - CARTAS DE TRAFEGABILIDADE (PERÍODO SECO E ÚMIDO)	269
APÊNDICE E - MAPA DE COMPARTIMENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	271
APÊNDICE F - CARTA DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO DE PLANÍCIES.	273
APÊNDICE G - PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA VAZÃO DE CHEIA.....	275
APÊNDICE H - CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS	279
APÊNDICE I - CHAVES DE CODIFICAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EM RELAÇÃO ÀS SUAS SUSCETIBILIDADE E RESTRIÇÕES	281
APÊNDICE J - CARTA DE POTENCIALIDADES E RESTRIÇÕES AO USO TURÍSTICO.....	283

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o turismo passou a desempenhar um papel de grande importância na economia mundial. Segundo dados da Organização Mundial de Turismo (OMT), entre 2000 e 2008, as viagens internacionais cresceram 4,2% ao ano, alcançando o total de 922 milhões de turistas em 2008, gerando uma renda de aproximadamente US\$ 5 trilhões (MINISTÉRIO DE TURISMO, 2009). Em 2012 o número total de chegadas internacionais em todo mundo, pela primeira vez na história, superou 1 bilhão de turistas (MINISTÉRIO DO TURISMO, 2012). No Brasil os números também são significantes, no total o país recebeu em 2012 5.676.843 turistas (MINISTÉRIO DO TURISMO, 2013).

O ecoturismo é um segmento da atividade turística que utiliza, sustentavelmente, o patrimônio natural e cultural, incentivando sua conservação e buscando a formação de uma consciência ambiental por meio da interpretação do meio ambiente, proporcionando o bem estar das populações envolvidas (EMBRATUR, 1994). Entretanto, este conceito muitas vezes não é condizente com que é praticado. As atividades ecoturísticas realizadas sem planejamento ocasionam sérios impactos negativos ao meio ambiente, principalmente quando é praticada em unidades de conservação (SOARES, 2007).

Percebe-se que na grande maioria das vezes o potencial ecoturístico de certas regiões é explorado de maneira inadequada, não somente no Brasil, mas em todo o mundo. Muitas regiões são exploradas para o ecoturismo sem qualquer consideração aos seus aspectos geológico - geotécnicos. Vias de acesso são construídas em terrenos com altas declividades, solos facilmente erodíveis e interceptam um grande número de canais de drenagem, que causam desde erosão nas vias e suas proximidades até o assoreamento dos corpos d'água.

Além do impacto negativo ao meio físico, a exploração de áreas para o ecoturismo, sem o conhecimento da sua dinâmica física e de seus níveis de suscetibilidades, pode colocar o próprio turista em situações de perigo e impor limitações às suas atividades. Como exemplos, pode-se citar a presença de áreas suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa, como escorregamento e queda de blocos, áreas sujeitas à inundação e cheias relâmpago e terrenos pouco trafegáveis.

Esta problemática se torna ainda mais intensa à medida que se observa uma carência de estudos em escala regional que avaliem as restrições e potencialidades destas áreas, tanto para a adequação das atividades já existentes quando para o planejamento de novas atividades turísticas.

A presente pesquisa está relacionada à análise desta problemática em parte do Parque Nacional Serra da Canastra, em Minas Gerais. Inicialmente, foi feita uma avaliação da evolução do uso do solo no Parque por meio de produtos de sensoriamento remoto de diferentes períodos, a fim de averiguar uma possível melhora ou piora da sua conversação. Em seguida, buscou-se levantar e analisar a localização das vias de acesso nos diferentes compartimentos da paisagem da área, bem como os possíveis impactos ocasionados. Por fim, foi produzida uma carta de potencialidades e restrições ao seu uso turístico, a partir da elaboração de cartas interpretativas que representam os principais processos ambientais que ocorrem nesta região.

1 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar as restrições e potencialidades de parte da área do Parque Nacional Serra da Canastra - MG quanto ao uso turístico, na escala 1:50.000, por meio da análise temporal do uso e ocupação do solo, inclusive a evolução das vias de acesso, e elaboração de documentos interpretativos que caracterizem restrições e suscetibilidades aos processos que ocorrem na área. Para tanto, os objetivos específicos estabelecidos são:

- Elaborar o mapa uso e ocupação do solo para diferentes períodos e analisar a evolução temporal do uso do solo na área de estudo;
- Avaliar a localização das vias de acesso e seus impactos ao meio físico;
- Elaborar documentos cartográficos que representem as suscetibilidades e restrições da área (movimentos de massa, inundação, incêndios, trafegabilidade e implantação de vias de acesso);
- Avaliar a suscetibilidade à ocorrência de cheias relâmpago nas cachoeiras;

2 Justificativa

O Parque Nacional Serra da Canastra (PNSC) foi criado pelo Decreto n.º 70.355, de 3 de abril de 1972, com uma área estimada em 200.000 hectares. Entretanto o PNSC possui somente parte desta área com situação fundiária regularizada, ou seja, sob posse e domínio do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. Esta área é denominada Chapadão da Canastra. O restante da área decretada e ainda não regularizada, conhecida como Chapadão da Babilônia, é constituída por propriedades privadas.

A escolha de parte da área não regularizada do parque para realização desta pesquisa justifica-se pela maior exposição desta região às atividades degradantes, devido à sua situação fundiária não regularizada, e principalmente ao seu grande potencial turístico, caracterizado pela beleza cênica encontrada em suas águas cristalinas, cânions, exuberantes cachoeiras, corredeiras e formação geomorfológica, mas que vêm sendo explorado sem planejamento adequado. Este uso inadequado vem causando inúmeros impactos ao meio físico, como o surgimento de processos erosivos e assoreamento dos corpos d'água, que são citados no plano de manejo do PNSC. Os impactos causados ultrapassam a área do parque, pois o mesmo possui uma grande rede de nascentes e cursos d'água que abastecem as bacias hidrográficas dos rios São Francisco, Grande e Araguari.

A realização de estudos envolvendo o mapeamento das suscetibilidades e restrições da área constitui uma ferramenta que pode ser utilizada pelos gestores para melhor planejamento e monitoramento desta unidade de conservação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos fundamentais sobre ecoturismo e geoturismo

2.1.1 Conceitos e origens

O turismo na natureza é dividido em vários segmentos, dentre eles o ecoturismo e o geoturismo (NASCIMENTO; RUCHKYS; MANTESSO NETO, 2008). Segundo Fennell (1998), provavelmente o primeiro a utilizar o termo ecoturismo foi Hetzer (1965), que também identificou quatro princípios fundamentais a serem seguidos pelas atividades ecoturísticas: minimizar o impacto ambiental, respeitar as culturas existentes no local turístico, maximizar os benefícios à população local e maximizar a satisfação do turista.

Apesar de Hetzer ter utilizado o termo em 1965, é de Ceballos - Lascuráin (1987) uma das primeiras definições. Ele definiu que ecoturismo é a "realização de viagens para áreas naturais que não tenham sido perturbadas ou contaminadas com o objetivo de admirar, estudar e apreciar a paisagem, plantas e animais, bem como as manifestações culturais (passadas ou presentes) encontradas nessas áreas".

De acordo com a International Ecotourism Society (2013), um conceito que é internacionalmente aceito e utilizado como referência quando se trata de ecoturismo é o proposto pela própria TIES (1990), "ecoturismo é uma viagem responsável para áreas naturais que conservam o meio ambiente e promovem o bem-estar da população local".

No Brasil, o conceito foi definido pela EMBRATUR como "um segmento da atividade turística que utiliza de forma sustentável o patrimônio natural e cultural, incentiva sua conservação e busca a formação de uma consciência ambientalista através da interpretação do ambiente, promovendo o bem-estar das populações" (BRASIL, 1994).

Orams (2001) afirma que o surgimento de termo ecoturismo ocorreu de forma muito rápida. Em 1980, o termo não existia e agora, pouco tempo depois, vários autores possuem definições a seu respeito. Entretanto, o termo tem sido alvo de muitos debates: O que é? Como deveria ser? E como deve funcionar? São questões presentes na literatura. Outro grande problema é que, atualmente, não existe ainda um entendimento dos fatores que estão envolvidos com o ecoturismo.

As definições de ecoturismo mais recentes, *The Ecotourism Society* (1991), *Ecotourism Association of Australia* (1992), *National Ecotourism Strategy of Australia* (Allcock et al., 1994) e Tickell (1994), diferentemente das mais antigas, Ceballos - Lascuráin (1987) e Boo (1990), tendem a ressaltar os princípios associados com o conceito de desenvolvimento sustentável (BLAMEY, 2001). Analisando as definições existentes, o mesmo autor sugere que o conceito de ecoturismo deve seguir três princípios fundamentais: ser baseado na natureza, promover a educação ambiental e cultural e a gestão sustentável.

O ecoturismo deve-se caracterizar pela utilização do patrimônio natural de forma sustentável, no entanto a denominação patrimônio natural não está relacionada apenas aos aspectos biológicos, mas também, aos geológicos. Assim, alguns pesquisadores buscando conservar e valorizar os aspectos geológicos do patrimônio natural vem promovendo a divulgação do geoturismo (NASCIMENTO; RUCHKYS; MANTESSO NETO, 2008).

Este novo segmento do turismo de natureza, geoturismo, foi definido pelo professor inglês Thomas Hose, em 1995, em sua publicação na revista *Environmental Interpretation*. Segundo Hose (1995), geoturismo é “a provisão de serviços e facilidades interpretativas que possibilitem aos turistas a aquisição de conhecimento e entendimento da geologia e geomorfologia de um sítio (incluindo sua contribuição para o desenvolvimento das ciências da Terra), além de apreciação estética”.

Em 2000, o mesmo autor reviu esta primeira definição, considerando agora o termo como sendo:

A provisão de serviços e facilidades interpretativas que promovem o valor e os benefícios sociais de lugares e materiais que possuem atrativos geológicos e geomorfológicos, de modo a assegurar a sua conservação para uso de estudantes, turistas e outras pessoas com interesses turísticos ou de lazer.

No ano de 2008 e 2012 este conceito foi novamente revisado pelo mesmo autor op. cit. De acordo com o conceito definido em 2012a, o termo deve ser utilizado para designar:

A provisão de serviços e facilidades interpretativas para geossítios e geomorfossítios e sua topografia abrangente, juntamente com seus artefatos in situ e ex situ associados, com vistas à sua conservação para as gerações atuais e futuras por meio da apreciação, aprendizado e pesquisa.

Além das definições de Hose, outros autores também tentaram definir o termo geoturismo, entretanto uma discordância foi gerada em torno dessa definição. O conteúdo abordado nos principais conceitos existentes são descritos por Hose (2012a):

- Hose (1995) - geointerpretação, geoconservação, geohistória, aprendizagem/compreensão, locais urbanos e rurais;
- Larwood e Prosser (1998) - geoconservação, compreensão, satisfação e viagem;
- Frey (1998) - educação/aprendizagem;
- Hose (2000) - geointerpretação, geoconservação, geohistória, educação/aprendizagem, apreciação, locais urbanos e rurais.
- Slomka e Kicinsha-Swidarska (2004) - educação, estética e viagem;
- Ruchkys (2005) - geointerpretação, geoconservação e geohistória;
- Joyce (2006) - aprendizagem e viagem;
- Ruchkys (2007) - geointerpretação, geoconservação, geohistória e apreciação;
- Nekouie-sadry (2009) - geointerpretação, geoconservação, aprendizagem e locais rurais;
- Amrikazemi (2010) - aprendizagem, apreciação e viagem;
- Dowling e Newsome (2010) - geointerpretação, geoconservação, aprendizagem/compreensão, apreciação e locais rurais;
- Hose (2012) - geointerpretação, geoconservação, geohistoria, aprendizagem e locais urbanos e rurais.

Visando atenuar a discordância na definição do termo, Newsome e Dowling (2010) integraram os conceitos propostos por Hose (1995; 2000; 2008), Joyce (2006) e Dowling e Newsome (2006), definindo geoturismo como:

"Uma forma de turismo em áreas naturais focado especialmente na paisagem e na geologia, promovendo o turismo em geosítios, a conservação da geodiversidade e o entendimento das ciências da terra por meio da apreciação e aprendizado. Isso é alcançado por meio de visitas guiadas às características geológicas, uso de geotrilhas e pontos de observação (mirantes)."

Essa discordância na definição do termo é pequena quando comparada a existente entre os conceitos de geoturismo e ecoturismo com os demais segmentos do turismo. Considerando esse problema, Newsome e Dowling (2010) analisaram a relação existente entre esses conceitos, como pode ser observado na Figura 1. O geoturismo tem uma forte ligação com o ecoturismo e uma ligação fraca com o turismo cultural e ambos estão conectados ao turismo de aventura por uma ligação fraca. Uma atenção deve ser dada para a relação existente entre o turismo de aventura e o geoturismo, pois existe um potencial uso conflitante, pois o turismo de aventura pode trazer danos aos geossítios. Apesar da ligação existente entre os conceitos, esses segmentos do turismo não são sinônimos, como é visto em muitas bibliografias que tratam sobre o assunto.

Figura 1 - Relação entre geoturismo e ecoturismo com os outros segmentos do turismo. Fonte: Newsome e Dowling (2010).

2.1.2 Ecoturismo: conservação do patrimônio natural

2.1.2.1 Ecoturismo no contexto mundial e brasileiro

É estimado que 50 milhões de pessoas no mundo pratiquem ecoturismo, com um crescimento anual de 20%. As viagens voltadas à natureza representam 10% das viagens dos americanos e europeus. As principais destinações ecoturísticas internacionais, no continente asiático, são para a Malásia e as Filipinas; no continente africano, desponta a África do Sul; na América do Sul, a Amazônia peruana, o Equador, a Venezuela e, somente depois, o Brasil; na América Central, a Costa Rica; e na América do Norte, os principais destinos são para o bem estruturado sistema de parques nacionais norte americanos, como Yellowstone e Iosemite (CÉSAR et al., 2007).

Apesar do atual desenvolvimento das atividades ecoturísticas, a importância do ecoturismo somente foi reconhecida no final do século XX durante a sétima reunião da Comissão para o Desenvolvimento Sustentável realizada em Nova Iorque, em 1998. Desde então, a ONU com o apoio da OMT e do PNUMA iniciou a organização, em seis regiões do planeta, de reuniões preparatórias para a Cúpula Mundial sobre Ecoturismo que veio a ser realizada em maio de 2002, na cidade de Quebec, no Canadá (MacLAREN, 2002).

Em 2002, ano declarado pela ONU como o ano Internacional do Ecoturismo durante a sétima reunião da Comissão para o Desenvolvimento Sustentável, reuniram-se em Quebec representantes dos governos, setores privados e ONGs de mais de 130 países. Foram discutidos os sucessos e as falhas do ecoturismo ao redor do mundo com base nas discussões das reuniões preparatórias, o que resultou na Declaração de Quebec sobre Ecoturismo (SHERIDAN; HALPENNY, 2002). A declaração faz recomendações para o desenvolvimento das atividades ecoturísticas sob um contexto de sustentabilidade baseado em políticas públicas que contemplem mecanismos de regulamentação e legislação.

Além da Declaração de Quebec, outros documentos importantes foram elaborados em conferências anteriores. O “Acordo do Monhok”, ocorrido entre 17 a 19 de novembro de 2000 em New Paltz/EUA, que definiu critérios e princípios para o desenvolvimento do ecoturismo e do turismo sustentável. Em 1995, a Conferência Mundial de Turismo Sustentável, resultou na elaboração da “Carta de Lanzarote”, que em seus 15 artigos faz apelos aos governos e à comunidade internacional para o desenvolvimento de atividades turísticas fundamentadas em critérios de sustentabilidade.

Singh (2010) lembra que resultaram das inúmeras conferências internacionais

realizadas sobre meio ambiente e sustentabilidade políticas, legislações, regulamentações e instrumentos que estão diretamente ou indiretamente ligados à promoção do ecoturismo como uma ferramenta de conservação ambiental e desenvolvimento econômico. São alguns exemplos: Proteção dos Animais Selvagens (Ato 1972), Proteção Ambiental (Ato 1986), Política Nacional Florestal (1988), Conservação Florestal (Ato 1980) e Tribunal Nacional de Meio Ambiente (Ato 1995). As demais políticas, legislações, regulamentações e instrumentos podem ser encontrados no trabalho de Singh (2010).

Além dos inúmeros instrumentos legais, as organizações mundiais também possuem um importante papel na conservação do patrimônio natural por meio do desenvolvimento do ecoturismo. Algumas estão diretamente ligadas ao ecoturismo e outras, mesmo apresentando um conteúdo mais abrangente, possuem programas específicos em ecoturismo. As principais são:

- World Tourism Organization (UNWTO): É a principal organização internacional relacionada com o turismo. Atua por meio de projetos de assistência técnica em mais de 100 países promovendo políticas de turismo competitivo e sustentável. Os membros da UNWTO incluem 155 países, 6 membros associados e mais de 400 membros afiliados representando setores privados, instituições educacionais, associações de turismo e autoridades de turismo local;
- International Union for Conservation of Nature (IUCN): É a maior e mais antiga organização ambiental com mais de 1.200 membros que desenvolve centenas de projetos de conservação ao redor do mundo. A IUCN possui um campo dedicado ao ecoturismo, em que são apresentados os projetos que estão em desenvolvimento. A organização ainda administra uma importante comissão, a World Commission on Protected Areas (WCPA), por meio do seu Programa Mundial de Áreas Protegidas;
- The Nature Conservancy (TCN): Trabalha em mais de 30 países com a missão de conservar as terras e águas das quais a vida depende;
- International Ecotourism Society (TIES): Fundada em 1990, é a mais antiga organização de ecoturismo do mundo, dedicada a disseminar informações sobre ecoturismo e desenvolvimento sustentável em 100 países.

No Brasil, desde 1985 o ecoturismo é debatido. Em 1987, a criação da Comissão Técnica Nacional, constituída por profissionais do IBAMA e da EMBRATUR, foi a primeira iniciativa governamental para ordenar a atividade com o monitoramento do Projeto de

Turismo Ecológico, em resposta às práticas existentes na época que eram pouco organizadas e sustentáveis (BRASIL, 1994).

Em 1989, foram autorizados pela EMBRATUR os primeiros cursos de guia de ecoturismo. Em 1992, com a Rio 92 esse tipo de turismo ganhou mais visibilidade, agradou de vez o brasileiro e impulsionou um mercado promissor que desde então não para de crescer (CAVALCANTE, 2006).

A atividade ecoturística estava crescendo fortemente, mas sem qualquer critério ou regulamentação apesar dos esforços governamentais, sendo quase que exclusivamente uma oportunidade mercadológica, sem nenhuma preocupação socioeconômica ou ambiental. Procurando resolver o problema, o ministério da indústria, comércio e turismo e o ministério do meio ambiente e da Amazônia Legal instituíram a Portaria Interministerial nº 001, de 20 de abril de 1994, que integrava ainda o IBAMA e a EMBRATUR, para desenvolver e propor uma política e um programa nacional de ecoturismo. Assim, foram determinadas as diretrizes para a Política Nacional de Ecoturismo vigentes até hoje.

Com o objetivo de gerenciar o uso de unidades de conservação em atividades ecoturísticas, o IBAMA e a EMBRATUR lançaram em 2000 o "Programa de Uso Público e Ecoturismo em Parques Nacionais - Oportunidade de Negócios". De acordo com esse documento, as atividades ecoturísticas estabelecidas em UCs devem contribuir para a preservação dos ecossistemas naturais e intensificar o aproveitamento do seu patrimônio natural e cultural para a geração de renda nessas áreas (IBAMA, 2013).

Em 2001, a EMBRATUR em conjunto com o Instituto de Ecoturismo do Brasil lançaram o projeto "Polos de Desenvolvimento de Ecoturismo no Brasil", que identificou 96 polos distribuídos nas cinco regiões do país onde o ecoturismo é praticado, além de fazer um inventário das características, potencialidades e infraestruturas de apoio disponíveis.

No ano seguinte, foi criado o comitê gestor do programa polos de ecoturismo do Brasil por meio da DN nº 430/02 com o objetivo de gerir e apoiar o desenvolvimento dos polos selecionados pela EMBRATUR e pelo Instituto de Ecoturismo do Brasil.

Apesar das inúmeras iniciativas públicas e privadas, Fonseca Neto (2007) lembra que a Política Nacional de Ecoturismo adotada ainda não atingiu sua plenitude, ou seja, um padrão que consiga obter o melhor rendimento da atividade, buscando sempre a equidade social, a viabilidade econômica e a sustentabilidade ecológica, o que evidencia a necessidade de mais esforços por parte de todos os envolvidos.

2.1.3 Geoturismo: geoconservação do patrimônio geológico

Algumas feições geológicas e geomorfológicas representam o grande patrimônio de uma região, características particulares como a sua originalidade, grandiosidade, especularidade, além do seu valor cultural revelado nas ações humanas. Essas feições podem se tornar um importante atrativo turístico para as pessoas que buscam alternativas de lazer, desporto e de interpretação ambiental por meio dos diversos ramos do turismo (SILVA, 2007).

Considerando a importância desse patrimônio torna-se necessário a sua geoconservação, uma vez que o geoturismo e a geoconservação têm uma relação ambivalente, assim o geoturismo pode promover a geoconservação e a geoconservação, pode por sua vez, promover o geoturismo (ARAÚJO, 2005) (Figura 2).

Figura 2 - Esquema representativo das inter-relações que estabelecem os conceitos de geodiversidade, geossítios, patrimônio geológico, geoconservação e geoturismo. Fonte: Modificado de Araújo (2005).

Nesse contexto, alguns conceitos devem ser melhor elucidados para compreensão do esquema acima. De acordo com Nascimento, Ruchkys e Mantesso Neto (2008), o termo geodiversidade existe a mais de 10 anos e foi mencionado provavelmente pela primeira vez

na Tasmânia, Austrália. Seu conceito é muito limitado para alguns autores, integrando apenas os minerais, rochas e fósseis, mas para outros ele é mais amplo englobando além dos elementos, os processos que podem estar atuando na sua gênese e em que momento podem estar atuando.

A ocorrência de um desses elementos ou mais, sejam eles resultantes da ação de processos naturais ou devido à intervenção antrópica, com valor singular do ponto de vista científico, pedagógico, cultural ou turístico representa um geossítio. O conjunto desses geossítios em uma dada área ou região constitui o seu patrimônio geológico (BRILHA, 2005).

Visando a preservação desse patrimônio geológico para as futuras gerações, o que é denominado geoconservação, surge o conceito de geoparque, que segundo Dowling e Newsome (2010) "é uma área nacionalmente protegida que contém locais de patrimônio geológico de particular importância, raridade ou apelo estético. Esses locais são parte de um conceito integrado de proteção, educação e desenvolvimento sustentável".

No conceito da UNESCO, os objetivos de um geoparque são educar e ensinar o grande público sobre temas geológicos e ambientais; prover meios de pesquisas para as geociências e assegurar o desenvolvimento sustentável por meio do geoturismo; reforçar a identificação da população com sua região, promovendo o respeito ao meio ambiente e estimulando a atividade socioeconômica com a criação de empreendimentos locais, pequenos negócios, indústrias de hospedagem, novos empregos, gerando novas fontes de renda para a população local e atraindo o capital privado (CPRM, 2013). Para um geoparque alcançar tais objetivos, três vertentes de enfoque devem ser seguidas: conservação, educação e geoturismo (DOWLING; NEWSOME, 2010).

2.1.3.1 Panorama do geoturismo no mundo e no Brasil

No final do século XX, iniciaram-se em alguns países, com o apoio da UNESCO, atitudes tendentes a valorizar como ponto de atração turística locais com ênfase nos aspectos geológicos (NASCIMENTO; RUCHKYS; MANTESSO NETO, 2007). A principal iniciativa foi a criação da Rede Europeia de Geoparques (*European Geoparks Networks - EGN*), em junho de 2000, por quatro membros fundadores: Réserve Géologique de Haute-Provence (França), The Petrified Forest of Lesvos (Grécia), GeoparkGerolstein/ Vulkaneifel (Alemanha) e Maestrazgo Cultural Park (Espanha).

Instigada pela criação da Rede Europeia de Geoparques e pelo apoio da UNESCO, foi criada em 13 de fevereiro de 2004 a Rede Global de Geoparques (*Global Geoparks Network- GGN*) em reunião realizada na sede da UNESCO, em Paris, da qual participaram os membros do Conselho Científico do Programa Internacional de Geociências (IGCP), representantes da União Geográfica Internacional (IGU) e da União Internacional das Ciências Geológicas (IUGS) e especialistas internacionais sobre conservação e promoção do patrimônio geológico.

Inicialmente, a GGN era formada por 8 geoparques chineses e pelos 17 geoparques que, na época, formavam a rede europeia de geoparques (BRILHA, 2005). Atualmente, a rede global de geoparques possui 90 geoparques distribuídos por 26 países. Os geoparques estão mais concentrados na Europa (2 na Áustria; 1 na Finlândia; 4 na França; 5 na Alemanha; 1 na Alemanha/ Polônia; 4 na Grécia; 1 na Hungria/ Eslováquia; 1 na Islândia; 2 na Irlanda; 1 na Irlanda do Norte; 8 na Itália; 2 na Noruega; 2 em Portugal; 1 na Romênia; 8 na Espanha; 1 na Croácia, 1 na República Tcheca e 6 no Reino Unido) e na China (27 geoparques). Os demais estão localizados na Ásia (5 no Japão; 1 na Coreia; 1 na Malásia; 1 no Vietnã e 1 na Indonésia) e América (1 no Brasil e 1 no Canadá).

A iniciativa mais recente da rede global de geoparques foi a proposta de criação da *Asia Pacific Geoheritage and Geoparks Network*, durante a primeira conferência regional sobre geoparques da Ásia-Pacífico, realizada entre 13 e 15 de novembro 2007 em Langkawi, na Malásia. A proposta foi posteriormente aprovada pela GGN durante a Bureau Meeting, realizada no dia 21 de Junho de 2008 em Osnabruck, na Alemanha (KOMOO; PATZAK, 2008). Atualmente, 8 países são integrantes da *Asia Pacific Geoheritage and Geoparks Network*, são eles: Austrália, China, Irã, Japão, Coreia, Malásia e Vietnã.

A criação de geoparques na região da Ásia - Pacífico ainda está no início, já que nem todos os países possuem geoparques inseridos na rede global de geoparques. Entretanto, o potencial para o estabelecimento de novos geoparques é promissor, pois vários países já estão buscando identificar o seu patrimônio geológico com vistas à conservação.

No Brasil a criação de geoparques ainda está no início. O governo, por meio do DNPM, criou em 1997 a Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP) com a finalidade de levantar e descrever os sítios geológicos e paleobiológicos do país de excepcional valor mundial para serem integrados a lista da União Internacional das Ciências Geológicas (*International Union of Geological Sciences - IUGS*), que gerencia a lista de sítios em âmbito mundial, sob as égides da UNESCO.

Apesar da criação do SIGEP em 1997, somente em 2004 ocorreram as primeiras discussões oficiais sobre geoturismo, geodiversidade e geoconservação no Brasil durante o 42º Congresso Brasileiro de Geologia, em Araxá, no estado de Minas Gerais (PIRANHA; DEL LAMA; BACCI, 2011). Desde então, vários projetos vem sendo desenvolvidos com vistas à geoconservação e sustentabilidade.

Em 2006, foi criado o projeto geoparques do Brasil pelo CPRM com o objetivo de identificar, levantar, descrever, inventariar, georreferenciar e divulgar os potenciais parques geológicos do país. Essa atividade está sendo desenvolvida com a colaboração de entidades federais, estaduais e locais. Esse projeto identificou 30 áreas com potencial para a criação de geoparques, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3- Mapa de localização das áreas propostas para a criação de geoparques no Brasil pelo Projeto Geoparques do CPRM. Fonte: Schobbenhaus (2006).

Algumas dessas áreas estão sendo avaliadas e outras serão avaliadas em trabalhos futuros. Segundo Nascimento, Schobbenhaus e Medina (2008), as áreas com propostas de criação de geoparques mais avançadas são: Quadrilátero Ferrífero (MG), por meio de iniciativas da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Universidade

Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e CPRM/SGB; Alto Ribeira (SP-PR), sendo uma proposta coordenada pelo CPRM/SGB; Bodoquena-Pantanal (MS), que é ação do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), com a participação da CPRM/SGB; e Campos Gerais (PR), que está em elaboração pela Minérios do Paraná S.A. (MINEROPAR).

Ainda no ano de 2006, o Serviço Geológico do Brasil publicou o Mapa Geodiversidade do Brasil, na escala 1:2.500.000, que objetivou traduzir o conhecimento geológico-científico aos distintos segmentos da sociedade brasileira visando a sua aplicação no uso adequado do território. Atualmente, estão disponíveis além do mapa geodiversidade do Brasil, mapas de geodiversidade de 18 estados (Alagoas, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pernambuco, Roraima, Sergipe, Pará, Piauí, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Rondônia, São Paulo e Santa Catarina) em escalas que variam de estado para estado.

Outros projetos também em nível estadual estão sendo desenvolvidos por diferentes entidades: Caminhos geológicos do Estado do Rio de Janeiro, Sítios Geológicos e Paleontológicos do Paraná, Caminhos Geológicos da Bahia e Monumentos geológicos do Rio Grande do Norte, entre inúmeros outros em nível local.

Além desses projetos apresentados, outros ainda vêm sendo realizados pelo GEOHeritage, um núcleo de apoio à pesquisa em patrimônio geológico e geoturismo que foi criado em 2011 pela Universidade do Estado de São Paulo como objetivo de fomentar e promover atividades de pesquisa, debate e extensão nas áreas de geoturismo, geoconservação e educação ambiental. Os projetos são: Potencial geoturístico das trilhas nos parques estaduais no Litoral Norte de São Paulo; Geoturismo Urbano: Centro Velho de São Paulo; Estudo granulométrico, mineralógico e químico de areias como subsídio ao desenvolvimento de atividades de ensino e divulgação em Geociências; Roteiro Geoturístico Rio-Santos (BR-101) - Trecho Litoral Norte do Estado de São Paulo.

Apesar dos inúmeros projetos existentes com vistas à promoção do geoturismo e da geoconservação, há apenas um geoparque membro da rede mundial de geoparques, o Geoparque Araripe, no estado no Ceará, criado em 2006. Entretanto, Piranha, Del Lama e Bacci (2011) ressaltam que a adoção da estrutura de geoparques talvez não seja a melhor opção para a promoção da geoconservação no Brasil. Seria preferível melhorar a eficácia da conservação do patrimônio geológico nos parques já existentes, tendo em vista que o país possui alguns instrumentos legais para a proteção das áreas naturais.

A primeira lei a incluir a proteção do patrimônio natural foi a Constituição Federal de 1988, no art. 216, ao citar os sítios paleontológicos como bens do patrimônio cultural.

Em 2000, foi homologada a Lei nº 9.985, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), sobre o qual também incide a proteção do patrimônio geológico, sendo um dos seus treze objetivos: *"proteger as características relevantes de natureza geológica, geomorfológica, espeleológica, arqueológica, paleontológica e cultural"*.

2.2 Vias de acesso em áreas naturais protegidas de uso ecoturístico

As vias de acesso são o tipo de infraestrutura mais importante em áreas naturais protegidas, visto que elas são projetadas para facilitar o acesso do visitante aos atrativos turísticos (TOMCZYK; EWERTOWSKI, 2013). Entretanto, a falta de planejamento e monitoramento pode conduzir a situações conflitantes com os propósitos das áreas protegidas, causando impactos ao meio físico.

2.2.1 Impactos

As trilhas tendem a modificar as relações sistêmicas da paisagem, por isso podem ser consideradas forças de tensão, acarretando distúrbios mais ou menos intensos de acordo com as características da área em que são implantadas (KROEFF; SILVA, 2010). Kabashima (2011) afirma que a maneira como a trilha é planejada, implantada e também sua infraestrutura (traçado, ergonomia, estruturas de drenagem, sinalização) exercem grande influência na intensidade dos impactos negativos ocasionados.

Dentre os impactos causados pela construção de estradas e trilhas, a erosão é um dos problemas mais comuns e permanentes, pois o processo erosivo uma vez desencadeado se mantém independentemente do uso do acesso continuar, diferentemente dos outros impactos, como a compactação do solo e perda da matéria orgânica (HAMMITT; COLE, 1998). Essa situação se agrava ainda mais por as trilhas serem construídas sem planejamento formal, sem seleção de traçado ou sem compreensão das condições biofísicas da área onde são implantadas. Isto se deve ao fato de muitos considerarem as trilhas como construções de "baixo nível", ou seja, não apresentarem alteração significativa ao meio ambiente (COSTA, 2006).

A estrutura linear das estradas, juntamente com a sua tendência de cruzar diferentes gradientes topográficos, exerce uma influência nos processos hidrológicos, em

escala de bacias hidrográficas, muito maior que poderia se esperar da pequena área de solo exposto que ocupam (LUCE, 2001). A superfície compactada das estradas não pavimentadas reduz a infiltração da água, consequentemente aumentando as taxas do escoamento superficial. As estradas além de receberem águas diretamente sobre seu leito, podem também servir para o escoamento das águas oriundas de áreas laterais à estrada, o que aumenta ainda mais os danos causados pela água (MACIEL, 2010).

Jones e Grant (1996) estudaram o efeito da construção de estradas para a extração de madeira sobre a alteração das vazões de pico na Cordilheira das Cascatas, Oregon, e constaram que seus valores aumentaram consideravelmente. Uma das principais causas desse efeito se deve é a interceptação dos canais de drenagem pelas estradas (Figura 4), sendo a situação mais crítica a alta densidade de drenagem combinada à alta densidade de estradas.

A proximidade das estradas com os cursos d'água, principalmente nas porções mais baixas do relevo que correspondem à zona de maior acúmulo de escoamento superficial, é preocupante no que se refere ao transporte de sedimentos e assoreamento dos rios (CATELANI; BATISTA; TARGA, 2005). Pesquisas realizadas em diversas áreas mostram as estradas como um dos principais contribuintes para o assoreamento dos rios em áreas de floresta. As estradas podem aumentar as taxas de turbidez em até três ordens de grandeza, quando comparado às condições naturais (GRACE III, 2002).

Figura 4 - Efeito da densidade de vias sobre a densidade de drenagem e da rede de vias sobre o número de cruzamentos vias/drenagem na paisagem (JONES et al., 2000).

2.2.2 Estudos para planejamento e monitoramento de vias de acesso

Considerando as dificuldades existentes em se isolar os elementos que condicionam os impactos provocados pela implantação de vias de acesso e buscando reduzir a subjetividade na coleta de informações, vários estudos vêm sendo desenvolvidos a fim de aperfeiçoar a compreensão e encontrar alternativas mais eficazes (KABASHIMA, 2011).

Leite (2002) analisa os aspectos do meio físico, declividade, hipsometria, solos (análises físicas e químicas), uso do solo, geologia, potencial à erosão laminar e traçado das trilhas, por meio de trabalhos preexistentes, ensaios de laboratório, levantamento de campo e interpretação de fotografias aéreas, com o objetivo de reestruturar as trilhas existentes no Morro do Cuscuzeiro/ SP em consoante às suas características físicas. O trabalho de Retzlaf (2008) avalia as consequências da localização das trilhas e sua suscetibilidade à erosão frente às atividades turísticas nos parques estaduais dos Campos Gerais Paranaenses (PR). Feola (2009) realizou o monitoramento da seção transversal da trilha do Parque Estadual Pico do Marumbi, no município de Morrotes (PR), com vistas à análise dos fatores controladores dos processos erosivos, objetivo este semelhante ao de Olive e Marion (2009) que por meio de análise de regressão determinou a declividade, *landforms*, alinhamento com a rede de drenagem e tipo de uso como os fatores mais influentes na perda de solo.

Geralmente a maioria dos estudos que envolvem o monitoramento das condições das trilhas são realizados em escalas grandes, considerando trilhas de pequena extensão. Normalmente o traçado das trilhas é levantado por meio de GPS e não por fotografias aéreas ou imagens de satélite. Os impactos são analisados em nível local, principalmente pela comparação das propriedades físicas e químicas do solo entre a área da trilha e áreas adjacentes.

Quanto aos estudos referentes ao planejamento para a implantação de trilhas, estes envolvem na sua maioria o levantamento do caminho de melhor custo por meio da sobreposição de atributos em ambiente SIG, como geologia, solos, topografia (*landforms*, elevação, declividade, forma e orientação das encostas, visibilidade), hidrologia (drenagem, lagos, áreas úmidas) e tipos de vegetação (XIANG, 1996; SNYDER et al., 2008; TOMCZYK; EWERTOWSKI, 2013). De modo geral, estudos destinados ao planejamento de vias de acesso são bem escassos, principalmente no Brasil, normalmente o que se desenvolvem são estudos que visam corrigir ou minimizar os impactos em vias já existentes.

2.2.3 Trafegabilidade

Trafegabilidade é a capacidade de uma região em possibilitar o movimento de veículos e é dependente das condições da área e do desempenho e características do veículo (SCHREIER; LAVKULICH, 1979).

Vias de acesso localizadas em regiões de baixa trafegabilidade não só dificultam o deslocamento, como também tendem a desencadear processos impactantes ao meio, além de exporem os visitantes às situações de perigo.

Os primeiros trabalhos que buscaram analisar a trafegabilidade foram desenvolvidos para fins militares e envolviam uma análise integrada das especificações do veículo juntamente com as condições do terreno, como o estudo elaborado pelo exercito americano (Department of the Army, 1994), que combinava a classificação do solo no Sistema Unificado de Classificação dos Solos, suas propriedades físicas, condições topográficas e climáticas e parâmetros de desempenho de diversos veículos militares para conferir a probabilidade de um terreno ser trafegável.

Schreier e Lavkulich (1979) ressaltam que devido à complexidade e dinâmica, a carta de trafegabilidade deveria ser elaborada individualmente para cada tipo de veículo.

Apesar desta recomendação somente poucos trabalhos, por exemplo, Eichrodt (2003) e Shoop (2005), avaliam conjuntamente as condições do terreno e desempenho dos veículos. Por razões de ordem prática, a maioria dos mapeamentos de trafegabilidade avaliam apenas as condições do terreno, como os de Santos e D'Alge (1990), Schreier e Lavkulich (1979), Slocum (2003), Gumós (2005) e Oliveira (2006). Os principais atributos do terreno considerados são: geologia; movimentos de massa; solos (textura, limites de Atterberg, resistência ao cisalhamento, permeabilidade, capilaridade, suscetibilidade ao congelamento); uso do solo; topografia (altitude, declividade e índice topográfico); hidrologia (bacias hidrográficas, rede de drenagem e reservatórios); rede viária; e condições climáticas (precipitação e temperatura).

Department of the Army (1994) resalta que a carta de trafegabilidade deve ser elaborada para diferentes condições meteorológicas, seca e úmida, visto que os parâmetros do solo, principalmente a resistência, são totalmente alterados.

2.3 Mapeamento geotécnico e geoambiental

Segundo Fiori (2004) até pouco tempo atrás, os mapas que diziam respeito ao geoambiente eram conhecidos como geotécnicos, havendo várias definições para este tipo de documento, algumas mais restritas ao campo geotécnico, IAEG (1976) e UNESCO (1976), e outras mais abrangentes que se aproximavam mais da conceituação de mapa geoambiental, como o conceito proposto por Zuquette em 1987.

Para Zuquette (1987), o mapa geotécnico deve ser entendido como:

Um processo que tem por finalidade básica levantar, caracterizar, classificar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico sejam geológicos, hidrogeológicos, hidrológicos e outros. Tais informações devem ser produzidas de maneira tal que possam ser utilizadas para fins de engenharia, planejamento, agronomia, saneamento, avaliações ambientais e outros. As informações devem ser tratadas através de processos de seleção, generalização, adição e transformação, para que possam ser relacionadas, correlacionadas, interpretadas e, ao fim, representadas em mapas, cartas e anexos descritivos, sempre respeitando os princípios básicos que regem a execução do mapeamento geotécnico conforme proposto por Thomas (1970).

Os mapas geoambientais diferenciam-se da cartografia geotécnica clássica em vista de sua característica intrínseca da multi e interdisciplinaridade, visão sistêmica do meio físico e linguagem acessível a outros profissionais, apontando as limitações e potencialidades frente às atividades de uso e ocupação do solo. Estes mapas são destinados principalmente ao planejamento, gestão e ordenamento do território. Para tanto, envolvem várias informações, como geologia, recursos minerais, geomorfologia, solos, aptidão agrícola, geoquímica, geofísica, geotecnia, riscos geológicos, uso e ocupação dos solos, cobertura vegetal, clima, águas superficiais e subterrâneas (SILVA; DANTAS, 2010).

Para Zuquette e Gandolfi (2004) uma reflexão do geoambiente só é possível com um número elevado de documentos cartográficos, que vão muito além do mapeamento geotécnico.

O mapa geotécnico deve ser entendido como um tipo de mapa geoambiental, mas no qual são consideradas as propriedades geotécnicas dos solos e das rochas. Tal distinção é necessária, pois muitos mapas ditos geotécnicos não fazem referências às propriedades geotécnicas dos solos ou das rochas, apesar de buscarem igualmente uma caracterização do meio físico, e nesse caso devem ser mais adequadamente denominados de geoambientais (FIORI, 2004).

O mesmo autor, lembra que a cartografia geoambiental e/ou geotécnica está relacionada com a elaboração de mapas ou cartas referentes aos problemas geoambientais e/ou geotécnicos que na maioria das vezes são ocasionados por algum desequilíbrio do meio físico ou do geoambiente.

Silva e Dantas (2010) afirmam que os mapas geoambientais devem ser elaborados com o objetivo de avaliar o arranjo e a diversidade das variáveis que compõem o meio físico (rochas, minérios, relevo, solos, clima, águas superficial e subterrânea), além de determinar as potencialidades e limitações frente às múltiplas formas de apropriação humana e econômica do território.

Fiori (2004) ressalta que as técnicas para elaboração de mapas de natureza geotécnicos ou geoambientais são muito variáveis, mas de modo geral, consistem na sobreposição de mapas temáticos, com destaque para o geológico, geomorfológico, pedológico, litológico, declividade, drenagem e uso e ocupação do solo. No caso dos mapas geotécnicos devem-se considerar as propriedades geotécnicas dos solos e das rochas, de modo a delimitar zonas ou unidades geotécnicas, cada qual caracterizada por uma expectativa de comportamento ou desempenho dos terrenos.

2.3.1 Principais metodologias internacionais e nacionais

A partir de 1950 a comunidade geotécnica passou a determinar um conjunto de procedimentos para a elaboração de trabalhos de cunho geotécnico, o que foi denominado mapeamento geotécnico. Diversas metodologias foram propostas por volta de 1970 com dois pontos de vistas diferentes. O primeiro voltado para o aproveitamento de informações pré-existentes em regiões onde havia bons registros de dados e, o segundo ponto de vista, para geração de informações geotécnicas em regiões onde não havia informações em número suficiente nem banco de dados organizado (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004).

De acordo com Rodrigues (2008) muitos países desenvolveram metodologias que foram aplicadas de acordo com as necessidades e as características de cada região. Desses métodos, alguns sofreram modificações e são utilizados até hoje. O mesmo autor descreve em seu trabalho as principais metodologias internacionais de mapeamento geotécnicos, são elas:

- **PUCE (*Pattern Unit Component Evalution*)**: É baseada na compartimentação da paisagem de acordo com as características geológicas/geomorfológicas,

geotécnicas, uso do solo e quanto à escala do estudo. A elaboração dessa metodologia iniciou-se em 1970 com os trabalhos de Grant na Austrália.

- IAEG: Foi elaborada pela *International Association of Engineering Geology and Environmental* em 1968. Para a elaboração do mapa geotécnico é considerado o caráter das rochas e solos, condições hidrogeológicas, geomorfológicas e fenômenos geodinâmicos;
- Metodologia Francesa: Os fatores analisados estão ligados à geologia, geomorfologia e geotecnia, resultando na produção de cartas de documentação, substrato rochoso, materiais de cobertura, hidrogeologia e geomorfologia que são integradas para a elaboração de cartas de aptidão;
- Metodologia Mathewson e Font: Nessa metodologia os documentos cartográficos são divididos por ordem hierárquica e cada ordem é destinada a um tipo de usuário. Os mapas de 1ª ordem (observação) e de 2ª ordem (engenharia) são destinados aos técnicos, os mapas de 3ª ordem (adequação aos recursos) ao público em geral e os mapas de 4ª ordem (planejamento) às prefeituras e empresas;
- Metodologia ZERMOS: O mapeamento geotécnico realizado por meio dessa metodologia objetiva analisar a probabilidade de movimentos de massa ou instabilidades e apresentar um zoneamento do risco sem previsão de tempo;
- Metodologia Matula: Foi desenvolvida por Matula em 1976 na Tchecoslováquia. É baseada na análise de geofatores que influenciam negativamente ou positivamente a ocupação urbana.

No Brasil, o pioneiro na elaboração de trabalhos de mapeamento e cartografia geotécnica foi o professor Haberlehner da Universidade Federal do Rio de Janeiro nos anos de 1965-1966. Deste então, vários grupos de pesquisas surgiram principalmente ligados às universidades e várias metodologias foram propostas (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004). Dentre as mais importantes, as desenvolvidas na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Universidade Estadual Paulista (UNESP/Rio Claro) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

A proposta metodológica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) foi desenvolvida por Zuquette (1987, 1993) e visa avaliar e retratar os possíveis comportamentos do meio físico frente às diferentes formas de uso do solo, processos naturais e induzidos, por meio da combinação de diversos atributos do meio físico, biótico e socioeconômico para a definição de unidades com o mínimo de heterogeneidade. Os

documentos cartográficos gerados são hierarquizados por ordem de importância ou por cadeia de dependência de informações. Os resultados gerados em cada nível devem considerar sempre os usuários potenciais e o tipo de informação que será apresentada, bem como uma escala adequada que permita representar os elementos com uma exatidão compatível.

A metodologia elaborada pelo IPT, de acordo com Prandini, Guidicini e Grehs (1995), expõe as potencialidades dos terrenos e estabelece diretrizes de ocupação diante de uma ou mais formas de uso. A elaboração desse documento se resume nas seguintes etapas:

- Levantamento preliminar: Identificação dos problemas existentes/previstos e compilação dos dados;
- Investigação orientada: Identificação dos fatores condicionantes dos problemas, mapeamento destes fatores e definição das escalas de trabalho;
- Compartimentação final: Análise integrada dos fatores mapeados e delimitação dos terrenos com comportamento homogêneo frente ao seu uso;
- Análise das medidas de controle: Levantamento das práticas e técnicas de implantação e manutenção dos usos do solo e proposição de medidas preventivas e corretivas;
- Representação: Representação cartográfica em linguagem adequada ao usuário.

A outra metodologia, UNESP/Rio Claro, foi desenvolvida por Zaine (2000) com o objetivo de produzir instrumentos adequados para a gestão e planejamento urbano frente às necessidades de seus principais usuários. O método consiste na adoção de diferentes escalas de abordagem para a elaboração de cartas e/ou mapas geotécnicos. O desenvolvimento dos trabalhos é feito em três etapas sucessivas, em níveis de detalhe crescentes, são eles:

- 1ª Etapa (geral): Estudos geológico-geotécnicos possibilitam a determinação de zonas de proteção e problemas ambientais. É essencial para a seleção das áreas para a etapa de semidetalhe;
- 2ª Etapa (semidetalhe): É realizada a quantificação dos parâmetros envolvidos com o objetivo de avaliar a susceptibilidade e adequabilidade e definição e/ou orientação dos estudos de detalhe;

- 3ª Etapa (detalhe): Estudos de detalhe são auxiliados por ensaios de campo e laboratório, como SPT e granulometria.

Quanto à elaboração de mapas geoambientais, Cendrero e Díaz de Terán (1987) apresentam duas abordagens metodológicas que podem ser seguidas. A primeira é a abordagem sintética, que subdivide a região de estudo de forma hierárquica (ambientes, sistemas, unidades e elementos), que devem apresentar características homogêneas quanto ao clima, landforms, processos, depósitos superficiais, etc. Essas subdivisões são descritas por meio de uma série de "características variáveis" (parâmetros observados ou quantificados) e "qualidades significativas" (propriedades que são avaliadas) que podem ser apresentadas em forma de tabela. Em seguida, as diferentes subdivisões "homogêneas" podem ser avaliadas para atividades de uso e ocupação do solo por métodos sinópticos ou *weighting/scaling* aplicados às "variáveis" e "qualidades".

A segunda abordagem, dita analítica, consiste na elaboração de uma série de mapas temáticos que representem os diferentes elementos, como rochas, solos, vegetação, etc. Posteriormente, esses mapas devem ser combinados utilizando o método *weighting/scaling* para gerar novos mapas que possibilitem uma avaliação integrada da capacidade, impacto ou aptidão para as atividades de uso do solo.

Outras metodologias que fazem referência ao mapeamento geoambiental são descritas no trabalho de Silva (2005), são elas: Amorim (2003), Fontes (2004), Lopes (2000) e Francés et al. (1990).

2.3.2 Principais tipos de documentos cartográficos gerados

Primeiramente é necessário distinguir as diferenças entre os tipos de documentos cartográficos gerados, mapas e cartas. Frequentemente esses termos são utilizados como sinônimos, mas essas palavras apresentam diferenças quanto ao seu uso. Mapa deve ser entendido como o registro de dados obtidos de um determinado aspecto, sem interpretação, e carta como um documento cartográfico que representa as informações, ou seja, as interpretações e associações dos dados contidos nos mapas.

Para Prandini, Guidicini e Grehs (1995) as cartas geotécnicas podem receber diferentes denominações não somente devido ao seu objetivo e conteúdo de alcance, mas também devido à própria natureza dos terrenos estudados, devendo assim serem divididas em:

- Cartas geotécnicas propriamente ditas: expõem as limitações e potencialidades dos terrenos e definem diretrizes de ocupação diante das diferentes formas de ocupação do terreno;
- Cartas de risco geológico: preponderam a avaliação de dano potencial à ocupação, frente a uma ou mais características ou fenômenos naturais ou induzidos pelo uso do solo (a própria atividade colocada em risco ou atividade assim conflitante);
- Carta de susceptibilidade: destacam um ou mais fenômenos ou comportamentos indesejáveis, pressupondo uma dada forma de uso do solo;
- Cartas de atributos ou parâmetros: quando se limitam a apresentar a distribuição geográfica de características de interesse (atributos e parâmetros geotécnicos) a uma ou mais formas de uso e ocupação;

Por outro lado, para Cerri (1990) as cartas geotécnicas abrangem uma grande variedade de tipos, cada qual dirigida a um fim específico. Embora com terminologias diversas, as cartas geotécnicas devem ser divididas em três grupos: cartas geotécnicas clássicas, cartas de susceptibilidade e cartas de risco. Dependendo dos seus objetivos, as cartas geotécnicas ainda podem ser divididas em genéricas, quando se configuram como um instrumento indicativo e orientativo, subsidiando as ações de planejamento e uso e ocupação do solo, ou ainda, cartas específicas quando se configuram em um instrumento determinativo e restritivo, impondo condições de projeto associadas a uma determinada forma de uso do solo.

Para Zuquette (1993) as cartas e mapas elaborados para diferentes grupos de objetivos, obras civis, avaliação de eventos perigosos e riscos associados e planejamento urbano podem ter diferentes classificações: mapas básicos fundamentais, mapas fundamentais síntese, cartas derivadas e interpretativas, cartas analíticas básicas, cartas de prognósticos de riscos, de problemas e de limitações, cartas de procedimentos, cartas de viabilidade (potencial) para usuários; cartas de orientações conclusivas.

2.3.3 Principais atributos geológico-geotécnicos

A definição dos atributos que serão utilizados para a elaboração de diferentes produtos cartográficos está relacionada à finalidade e à escala do trabalho. Da escolha dos atributos corretos depende em grande parte a eficiência e a qualidade do mapeamento (PEJON; ZUQUETTE, 1995). Zuquette (1991) selecionou atributos fundamentais que devem

ser mapeados para planejar a ocupação de uma região, com base em trabalhos realizados no Brasil e em outros países e nas características brasileiras do meio físico, como pode ser observado no Quadro 1.

Campos de conhecimento	Tipo/ Aspecto	Grupos de atributos	Atributo
Geologia	substrato rochoso	materiais	tipo rochoso litologia mineralogia densidade resistência permeabilidade estruturas distribuição profundidade grau de intemperismo alterabilidade potencial para material de construção
		processos	erosão deposição sismicidade subsidência
	materiais inconsolidados	gerais	origem e textura distribuição permeabilidade índice de vazios mineralogia erodibilidade fertilidade potencial de corrosividade
		específicas	expansibilidade variação em profundidade características químicas capacidade de campo e murchamento processos de intemperismo e pedológico resistência/ suporte massas específicas ou sólidos e aparente seca potencial para aterros

Quadro 1 - Informações fundamentais para o planejamento. Fonte: Zuquette (1991) (Continua).

Campos de conhecimento	Tipo/ Aspecto	Grupos de atributos	Atributo
Águas	superficiais		escoamento infiltração áreas de acúmulo de águas características físico - químicas
	subterrâneas		aquíferos (livres e confinados) áreas de recarga profundidade/ espessura poços cunhalidade características físico - químicas
Clima			pluviosidade temperatura umidade relativa ventos insolação evapotranspiração intensidades pluviométricas
Geomorfologia	morfometria		altitudes declividades e sentido
	morfografia	unidades básicas	landforms (encosta e bacia de inundação)
			formas de encostas comprimentos das encostas ou landforms

Quadro 1 - Informações fundamentais para o planejamento. Fonte: Zuquette (1991) (*Conclusão*).

2.4 Processos ambientais

O meio ambiente está em constante transformação devido à ocorrência de inúmeros processos de cunho hidrológico, geológico de superfície e subsuperfície, ecológico, atmosféricos (SÁNCHEZ, 2008). O entendimento da probabilidade de ocorrência desses processos em áreas protegidas, bem como dos fatores que os influenciam pode ser realizada por meio de estudos de suscetibilidade. Segundo Diniz (2012), nos estudos de suscetibilidade devem-se buscar avaliações mais gerais dos terrenos quanto ao seu comportamento frente aos processos envolvidos independente da sua ocupação, representando os resultados em cartas que embora tenham caráter orientativo, devido à escala, podem subsidiar importantes instrumentos de planejamento.

2.4.1 Processos erosivos e Movimentos de massa

A dinâmica das encostas é conduzida pelos processos de transporte de massa (erosão natural ou antropogênica) e pelos movimentos gravitacionais de massa (CUNHA, 1991). De acordo com Pejon (1992), a erosão é classificada como natural, quando é controlada somente pelo equilíbrio dos fatores naturais, e antropogênica, na existência de interferência humana sobre o ambiente natural.

O início do processo erosivo ocorre devido ao impacto da gota de chuva no terreno, conhecido como *splash*, que desagrega as partículas de solo. Esta ação é completada pelo acúmulo do escoamento superficial em volume suficiente para provocar o arraste das partículas desagregadas (CUNHA, 1991). A erosão pode ser de dois tipos, dependendo de como se processa o escoamento superficial: laminar, quando o escoamento ocorre de forma uniforme, e linear, quando o volume do escoamento superficial é concentrado em canais que são formados no terreno.

Diferentemente da erosão laminar, a linear pode ser classificada em diferentes tipos, dependendo do seu grau evolução. Segundo Pejon (1992), a erosão linear pode se apresentar na forma de pequenos sulcos, que podem evoluir para ravinas, até erosões totalmente descontroladas que recebem o nome de voçorocas.

Em relação aos movimentos de massa, existem inúmeras classificações que os diferenciam. Entre os trabalhos existentes, destacam-se as de Varnes (1958, 1978), Guidicini e Nieble (1976) e Turner e Schuster (1996), por tratarem de forma completa a evolução, os critérios, as restrições e outros aspectos importantes das classificações (INFANTI Jr.; FORNASARI FILHO, 1998).

No Brasil, Augusto Filho (1992) propôs uma classificação para os movimentos de massa de acordo com a dinâmica dos ambientes tropicais, dividindo-os em rastejos, escorregamentos, quedas e corridas.

Os rastejos são caracterizados por movimentos lentos de grandes massas, podendo ocorrer em solos de alteração (residual) ou talús, que é um tipo de material transportado por grandes movimentos gravitacionais de massa, apresentando uma disposição desordenada de blocos de rocha e solos em condições de baixa declividade, 15° a 20°, (CUNHA, 1991). Esse material que consiste em blocos de rocha e solo diferencia-se do colúvio pela maior presença de blocos de rochas, porém ambos apresentam grande instabilidade natural.

Diferentemente dos rastejos, os escorregamentos são movimentos rápidos que mobilizam volumes bem definidos de solo e/ou rocha. Dependendo da geometria e dos materiais mobilizados eles podem ser classificados em planares, circulares ou em cunha (INFANTI Jr.; FORNASARI FILHO, 1998).

As quedas são caracterizadas pelo movimento do tipo queda livre ou plano inclinado com velocidade muito alta do material rochoso em forma de placas, lascas ou blocos. Estão incluídas nesse processo o tombamento e o rolamento de matacões (AUGUSTO FILHO, 1992). O movimento de tombamento ocorre devido à rotação de blocos condicionada pela presença de estruturas geológicas com alto ângulo de mergulho, enquanto que o rolamento de blocos consiste no movimento de blocos ao longo de uma superfície inclinada que anteriormente estavam parcialmente imersos no solo e que devido à erosão natural perderam o apoio com esse material de contato (INFANTI Jr.; FORNASARI FILHO, 1998).

Por fim, as corridas são movimentos com muitas superfícies de deslocamento, mobilizando grande volume de material (solo, água e rocha) ao longo de drenagens com velocidades médias a altas, podendo alcançar um extenso raio mesmo em áreas planas (AUGUSTO FILHO, 1992).

As técnicas de análise da estabilidade de encostas quanto a esses diferentes movimentos são baseadas no estudo dos parâmetros envolvidos no processo de instabilização. As principais técnicas são: inventário, análise heurística (análise geomorfológica, combinação qualitativa de mapas), abordagem estatística (análise estatística bivariada, análise estatística multivariada) e abordagem determinística (SOETERS; Van WESTEN, 1996).

2.4.2 Incêndios

A suscetibilidade à ocorrência de incêndios é dependente de variáveis que podem tanto influenciar a disponibilidade da fonte de fogo para a ignição quanto as condições que favorecem a sua propagação (OLIVEIRA, 2002). As principais variáveis são citadas abaixo, bem como a sua contribuição para a propagação do incêndio.

- A topografia afeta o comportamento do vento. O fogo se propaga mais rapidamente em áreas de alta declividade (JAISWAL et al., 2001), visto que quanto mais inclinada a encosta, maior é o efeito das colunas de convecção que diminuem a umidade da vegetação acima do incêndio acelerando propagação do fogo no sentido ascendente (CASTRO et al., 2002). A orientação das encostas é outro fator

importante (Chuvieco e Congalton, 1989), que juntamente com a inclinação dos raios solares, latitude, grau de nebulosidade e densidade e estrutura da folhagem do povoamento vegetativo determinam o nível de radiação solar disponível para a redução da umidade do material combustível (LIU, 2006).

- O fator climático exerce papel fundamental na ocorrência e comportamento dos incêndios (JAISWAL et al., 2001). Elementos como a precipitação, temperatura do ar, deficiência hídrica e evapotranspiração potencial tem efeitos característicos sobre o comportamento do fogo (PRUDENTE, 2011), principalmente sobre o conteúdo de umidade do material combustível (OLIVEIRA, 2002). Outro fator climático importante é o vento, uma vez que também influencia o grau de secagem do combustível e a renovação do suprimento de oxigênio durante a queima (LIU, 2006).
- A variação da cobertura vegetal implica em diferentes composições químicas que podem influenciar a velocidade e quantidade de calor liberado em um incêndio (OLIVEIRA, 2002).

A umidade do solo não é um atributo considerado nas análises de suscetibilidade à ocorrência de incêndios, pois esta é uma variável decorrente do histórico de precipitações e não necessariamente válida. Por exemplo, incêndios podem ocorrer em uma área após um logo período de chuvas se a temperatura e a radiação solar forem altas suficientemente para secar a matéria orgânica, mesmo o subsolo estando encharcado. No Pantanal, incêndios ocorrem mesmo em áreas com lençol freático aflorante, mas cuja vegetação está seca (SETZER; SISMANOGLU, 2012).

Assim como a umidade do solo, não é habitual se considerar as descargas elétricas dos raios como um fator condicionante, visto que dão origem apenas a uma pequena percentagem de incêndios durante a estação chuvosa, não queimando assim grandes áreas.

Como visto, é muito grande a diversidade dos fatores que afetam o início e a propagação do incêndio, o que torna necessária a utilização de uma abordagem de análise integrada desses fatores, como a proposta por Chuvieco e Congalton (1989) que vem sendo utilizada por vários autores: Ferraz e Vettorazzi (1998), Pezzopane, Oliveira Netto e Vilela (2001); Oliveira (2002); Jaiswal et al. (2002); Oliveira et al. (2004); XU et AL. (2005); Santos, Louzada e Eugenio (2007); Prudente (2010); Chavan, Das e Suryawanshi (2012).

A proposta metodológica de Chuvieco e Congalton (1989) envolve a integração por meio de SIG de diferentes variáveis (vegetação, declividade, orientação das vertentes e proximidade de vias de acesso), resultando em um único índice de “*hazard*” que pode ser

utilizado para mapear a área. Com a utilização desta metodologia por outros autores, novas variáveis foram inseridas na análise e outras substituídas ou excluídas. Em muitos trabalhos que buscam avaliar apenas a suscetibilidade e não o “*hazard*” o componente humano, proximidade de vias de acesso, é excluído da análise.

2.4.3 Inundação

Quando a precipitação sobre uma bacia hidrográfica é muito intensa a vazão que chega ao rio pode ser superior a sua capacidade de drenagem, ou seja, da sua calha normal, resultando na inundação das áreas próximas (TUCCI, 2009a).

Devido à sua complexidade, o processo de inundação pode ser dividido em vários tipos, os principais são definidos por Souza (2005):

- Inundação de planície (*riverine flooding*) - causada pelo transbordamento de canais fluviais, de modo que a abrangência das áreas afetadas é proporcional à ordem hierárquica do canal.
- Enchente (cheia) relâmpago (*flash flood/ flooding*) - causada pelo transbordamento de canais pluviais nas baixas encostas, sendo a abrangência das áreas invadidas muito restrita devido à baixa ordem hierárquica dos canais e declividades mais acentuados, comuns às áreas atingidas por esse fenômeno.

A inundação é resultado da combinação de duas causas distintas: as causas primárias que são devido às condições meteorológicas e atmosféricas (frequência, tipo, intensidade e duração das chuvas) e as causas secundárias que estão relacionadas às características da bacia de drenagem em termos geomorfológicos, geológicos e de cobertura do solo (YOUSSEF et al., 2009).

2.4.3.1 Características das precipitações

As precipitações podem ser classificadas de acordo com as condições que produzem o movimento vertical do ar em ciclônicas (frontal ou não frontal), orográficas e convectivas (VILLELA; MATTOS, 1975). Precipitações convectivas de alta intensidade são mais pronunciadas sobre a vazão de bacias com pequena área de drenagem, podendo

provocar grandes enchentes, enquanto que em bacias maiores as precipitações frontais são mais impactantes atingindo grandes áreas com intensidades médias (TUCCI, 2009a).

Além da intensidade, a distribuição e duração da precipitação são fatores que influenciam fortemente o aumento da vazão dos rios. Dada à importância dessas variáveis no processo de inundação é necessário o conhecimento de sua relação por meio de equações genéricas de intensidade, duração e frequência, conhecidas como equações i-d-f, que se apresentam conforme a Equação 1.

$$i = \frac{K \cdot Tr^a}{(t + b)^c}$$

Equação 1

Em que, i é a intensidade da precipitação em mm/h, t é a duração e K , a , b e c são parâmetros determinados estatisticamente de acordo com dos dados de precipitação da área e Tr é o período de retorno, definido por Vilella e Matos (1975) como o período de tempo em anos em que um determinado evento deve ser igualado ou superado pelo menos uma vez.

De acordo com Tucci (2009a), para a construção de curvas i-d-f é necessário ajustar uma distribuição estatística aos maiores valores anuais de precipitação para cada duração. A escolha das durações depende de quanto o pluviógrafo existente na área permite a discretização dos dados. Quando este permite a discretização em até 5 min, em geral são escolhidas as seguintes durações: 5, 10, 15, 30 e 60 min, 1, 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas. Em seguida, devem ser adotados os seguintes passos: (a) para cada duração são obtidas as precipitações máximas anuais com base nos dados do pluviógrafo; (b) para cada duração mencionada é ajustado uma distribuição estatística; (c) dividindo-se a precipitação pela sua duração obtém-se a intensidade; (d) as curvas resultantes são conhecidas como relação i-d-f.

Na prática essa metodologia pode ser aplicada apenas em localidades que possuem estações pluviográficas que quantificam a precipitação instantânea. Porém, como ressaltado por Tucci (2009a), frequentemente é necessário determinar a relação i-d-f para locais onde não se dispõe de postos pluviográficos. Neste caso, podem ser aplicadas metodologias que se baseiam em dados disponíveis na região para estimar estas relações no local de interesse, são elas: método de Bell e método das relações de durações.

Diferentemente do método de Bell, o método das relações de durações é mais utilizado no Brasil, conforme trabalhos de Cardoso, Ullmann e Berto (1998), Oliveira et al.

(2000), Oliveira et al. (2005), Carvalho (2007), Damé et al. (2010), Aragão et al. (2013). Segundo Tucci (2009a), o método das relações entre durações é de grande aplicabilidade visto a existência de uma grande rede de pluviômetros com longa série histórica dispostos por quase todo o território nacional.

De maneira geral, o método consistiu na desagregação de chuvas diárias com determinada frequência em chuvas de menor duração, utilizando relações propostas pela CETESB em 1979 (CARDOSO; ULLMANN; BERTO, 1998). Apesar das relações determinadas pela CETESB terem sido elaboradas para todo o território nacional, recomenda-se que no caso de existir nas proximidades do local de interesse um posto pluviográfico é apropriado utilizar na desagregação as relações deduzidas a partir das curvas i-d-f desse posto.

2.4.3.2 Características morfométricas de bacias hidrográficas

As características físicas de uma bacia exercem grande influência sobre seu regime hidrológico (VILLELA; MATTOS, 1975). Para Morisawa (1962), fatores geomorfológicos e geológicos influenciam significativamente a velocidade do escoamento e a vazão dos rios. Souza (2005) levanta os parâmetros morfométricos que apresentam melhor relação com o desencadeamento potencial de inundações (Quadro 2).

Parâmetro morfométrico	Implicação hidrológica no desenvolvimento de inundações
Ordem hierárquica dos canais	Aumenta a descarga, o volume de escoamento das águas.
Área da bacia de drenagem	Aumenta a descarga, o volume de escoamento das águas.
Perímetro da bacia de drenagem	Apresenta relação diretamente proporcional à área da bacia e ao número de canais de 1ª ordem.
Número total de canais e frequência percentual do número de canais	Aumenta o volume e a velocidade do escoamento.
Frequência de canais de 1ª ordem	Aumenta a velocidade com que o escoamento chega ao canal principal.
Comprimento total do canal principal ou comprimento da bacia	Aumenta o tempo que a cheia leva para percorrer toda a bacia.

Quadro 2 - Parâmetros morfométricos e sua relação com as características hidrológicas das bacias de drenagem e eventos de inundação. Fonte: Modificado de Souza (2005) (*Continua*).

Parâmetro morfométrico	Implicação hidrológica no desenvolvimento de inundações
Declividade média do canal principal ou declividade da bacia	Canais com declividade média alta aumentam a velocidade do escoamento, porém não transportam grandes volumes de água. Apresentam uma relação inversamente proporcional à área da bacia.
Forma da bacia	Influencia a dinâmica de escoamento das águas, tornando-o melhor em bacias mais alongadas ou retangulares.
Índice de circularidade	Aumenta a concentração do escoamento no exultório da bacia.
Fator de forma	Influencia a dinâmica de escoamento das águas, tornando-o melhor em bacias estreitas e longas e pior em bacias circulares, mais suscetíveis à inundação.
Densidade hidrográfica	Aumenta a velocidade de concentração das cheias.
Densidade de drenagem	Aumenta a velocidade de concentração das cheias.
Densidade de confluências	Aumenta a velocidade do escoamento e acelera a formação e propagação das enchentes.
Relação de bifurcação	Apresenta relação inversamente proporcional à permeabilidade dos solos.
Taxa de relevo e Número de rugosidade	Apresenta relação diretamente proporcional ao tempo de concentração do escoamento superficial, aumentando os picos das enchentes.

Quadro 3 - Parâmetros morfométricos e sua relação com as características hidrológicas das bacias de drenagem e eventos de inundação. Fonte: Modificado de Souza (2005) (*Conclusão*).

Vários trabalhos recentes tem buscado correlacionar os parâmetros morfométricos com desenvolvimento de processos de inundação: Souza (2005); Moawad (2008); Angillieri (2011), Romshoo, Bhat e Rashid (2012); Bajabaa (2013); Leal e Ramos (2013). Dentre os trabalhos citados, os princípios metodológicos elaborados por Souza (2005) merecem destaque devido à sua aplicabilidade.

A metodologia envolve a integração do maior número de parâmetros morfométricos possíveis à análise, considerando as características geomorfológicas e geológicas da área de interesse, ou seja, os parâmetros utilizados no trabalho de Souza (2005) normalmente não são representativos em demais áreas, cada área apresenta parâmetros que a caracterizam melhor.

Após o cálculo dos parâmetros, a série de valores de cada parâmetro é dividida pelo número de classes de suscetibilidade com a qual se deseja trabalhar, para tanto devem ser identificados os valores máximos e mínimos e a média aritmética da série, excluindo-se os

valores extremos para evitar erros na classificação. Esses valores extremos são integrados aos valores máximos ou mínimos no final de classificação.

Com os intervalos de cada parâmetro morfométrico definidos, são atribuídos a eles números de pontos que variam de 1 a 5 ou outros valores, dependendo do número de classes de suscetibilidade adotados, no exemplo, 1 ponto para a classe menos suscetível e 5 pontos para a mais suscetível. Esse procedimento é seguido para todos os parâmetros morfométricos calculados em cada bacia. No final, os pontos referentes à suscetibilidade morfométrica dos parâmetros de cada bacia são somados e uma nova classificação é realizada, dividindo a série de valores encontrada para todas as bacias em intervalos, identificando novamente os valores máximos, mínimos e a média aritmética e excluindo os valores extremos. Novamente os intervalos encontrados são classificados no número de classes de suscetibilidade adotados, no caso, de 1 (suscetibilidade morfométrica muito baixa) a 5 (suscetibilidade morfométrica muito alta).

Souza (2005) ressalta que alguns parâmetros morfométricos poderão ser ora diretamente proporcionais, ora inversamente proporcionais à suscetibilidade morfométrica das bacias, de acordo com a sua implicação hidrológica no desenvolvimento de inundações (Quadro 2).

2.4.3.3 Métodos para a estimativa da vazão de cheia

As vazões podem ser classificadas em vazões normais e vazões de cheias. As vazões normais são as que escoam habitualmente pelos canais, enquanto as vazões de cheia são as que ultrapassam o limite da calha dos canais, ocasionando as cheias que podem provocar inundações (JORGE; UEHARA, 1998).

De acordo com os autores op. cit. existem vários métodos para prever a vazão de cheias. DAEE (2005) apresenta diferentes metodologias que podem ser utilizadas dependendo da extensão da série histórica de dados fluviométricos, quando disponíveis, ou na sua ausência a extensão da área de drenagem (Figura 5) ou ainda como lembrado por Tucci (2009a) por meio da regionalização de vazões.

Figura 5 - Diagrama das metodologias disponíveis para o cálculo de vazões de cheia. Fonte: Modificado de DAEE (2005).

Genovez (1991) buscou avaliar a precisão dos métodos empíricos na previsão das vazões de cheia em 15 bacias rurais do estado de São Paulo com áreas variando de 38 a 398 Km². As vazões de pico foram calculadas empiricamente por meio dos métodos Racional, I-Pai-Wu, Ven Te chow, SCS, e método do Hidrograma Unitário Regionalizado de REDA e, posteriormente, comparadas com vazões observadas. No geral, todos os métodos apresentaram vazões muito superiores aos valores observados, porém alguns se mostraram mais adequados. As vazões de pico calculadas pelos métodos Racional, SCS e Ven Te Chow se mostraram extremamente maiores que as observadas, enquanto que as calculadas pelo I-Pai-Wu e pelo Hidrograma Unitário Regionalizado de REDA apresentaram menores vazões de pico, embora ainda superestimem parte das vazões de enchente.

Apesar do método de REDA apresentar bons resultados, Genovez (1991) ressalta que não é possível realizar uma comparação direta com os outros métodos, visto que são utilizados no cálculo da vazão de cheia valores de precipitação observados, o que impõe ao método uma vantagem sobre os demais.

O método I-Pai-Wu foi abordado por Wu em 1963, que buscou relacionar a forma dos hidrogramas de cheia com as características morfométricas de 21 pequenas bacias no estado da Indiana, Estados Unidos (Wu; Deller; Diskin, 1964). Segundo Genovez (1991), o método I-Pai-Wu modificado, como é conhecido atualmente, sofreu modificações do estudo original que foram propostas por Costa (1964), Uehara (1969) e PLANIDRO (-).

2.5 Ferramentas auxiliares no estudo de processos ambientais

2.5.1 Geoprocessamento

Geoprocessamento é um conjunto de tecnologias de coleta e tratamento de informações espaciais para um objetivo específico. Câmara e Davis (2001) afirmam que as ferramentas computacionais para geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e criar bancos de dados georreferenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos, influenciando de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional.

Segundo Câmara e Monteiro (2001), os tipos de dados utilizados em geoprocessamento são:

- Dados temáticos - Descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica expressa de forma qualitativa. Ex: Mapas de pedologia e de aptidão agrícola de uma área. Esses dados são obtidos a partir de levantamento de campo e inseridos no sistema por digitalização ou por classificação de imagens;
- Dados cadastrais - Diferenciam-se dos dados temáticos na medida em que um dos seus elementos é um objeto geográfico que possui atributos e pode estar associado a várias representações gráficas. Ex: lotes de uma cidade são elementos do espaço geográfico que possuem atributos (dono, localização, valor venal, etc) e podem ter representações gráficas diferentes em mapas de escalas distintas. Os atributos estão armazenados em um sistema gerenciador de banco de dados;
- Redes - Denotam informações referentes a serviços de utilidade pública (água, luz e telefone), redes de drenagem (bacias hidrográficas) e rodovias. Nesse tipo de dado, cada objeto geográfico possui uma localização geográfica exata e está sempre associado a atributos descritivos presentes no banco de dados;
- Modelos Numéricos de Terreno - São utilizados para expressar uma grandeza que varia continuamente no espaço. Podem ser utilizados para modelar unidades geológicas, mas frequentemente estão associados a estudos de altimetria;
- Imagens - Representam formas de captura indireta da informação espacial, sendo obtidas por meio de satélites, fotografias aéreas ou sensores aerotransportados. São

armazenadas em forma de matrizes em que cada elemento da imagem (pixel) tem um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente. Para distinguir os objetos geográficos que estão contidos na imagem é necessário recorrer a técnicas de fotointerpretação e classificação.

Essa tecnologia adquiriu um papel muito importante em trabalhos de coletas de informações para a tomada de decisões sobre problemas urbanos, rurais e ambientais, pois além de possibilitar a realização de análises complexas, o geoprocessamento baseia-se em tecnologias de custo relativamente baixo (FONTES, 2004).

2.5.1.1 Sistema de Informação Geográfica

Um sistema de informação geográfica é um conjunto de dados computacional que integra hardware e software, permitindo capturar, gerenciar, analisar e exibir informações geograficamente referenciadas (ESRI, 2012).

Segundo Augusto Filho (2011) existe no mercado uma grande diversidade de programas de SIGs disponíveis, mas de modo geral é possível apontar uma estrutura comum a estes esses programas: banco de dados espacial e de atributos, sistema de representação cartográfica, sistema de digitalização de mapas, sistema de gerenciamento de dados, sistema de análise geográfica, sistema de processamento de imagens e sistema de análise estatística (Figura 6).

Figura 6 - Arquitetura de saídas e entradas típicas de um SIG atual. Fonte: Eastman (1992).

Um SIG possibilita o armazenamento, integração e geração de novas informações a partir do processamento gráfico de informações espaciais e informações alfanuméricas de banco de dados (CELESTINO; DINIZ, 1998). Apesar das suas inúmeras habilidades, os SIGs, como toda tecnologia, também apresentam vantagens e desvantagens como pode ser observado no Quadro 3.

Vantagens	Desvantagens
Grande variedade de técnicas e análises disponíveis.	<p>Uma grande quantidade de tempo é necessária para a entrada de dados, ex: digitalização.</p> <p>O SIG possui uma grande quantidade de ferramentas que teoricamente estão disponíveis, mas que, muitas vezes, não podem ser utilizadas devido à falta dos dados de entrada necessários.</p>
Devido à sua alta velocidade de cálculo, é possível o uso de técnicas complexas, que requerem um grande número de sobreposições de mapas e cálculos.	
Podem ser utilizados para melhorar modelos, por meio da avaliação de seus resultados e ajuste das variáveis de entrada, assim resultados mais precisos podem ser alcançados.	

Quadro 4 - Vantagens e desvantagens do SIG. Fonte: BELL (2007).

O principal diferencial dos programas SIG em relação a outros programas de banco de dados tradicionais, de desenho digital e de tratamento de imagens são suas funções e

ferramentas de análise espacial, são elas: funções de manipulação, que estão relacionadas às ferramentas de preparação dos dados, e funções de análise, que envolvem operações de sobreposição, classificação, cruzamento e interpolação (AUGUSTO FILHO, 2011). Os dados disponíveis para essas operações são armazenados de maneira sistemática em formato vetorial (pontos, linhas e polígonos) ou raster (grade de células) e podem ser obtidos por meio de imagens de satélite, fotografias aéreas, aeromagnetometria, gravimetria e vários tipos de mapas (BELL, 2007).

Medeiros e Câmara (2001) lembram que Sistemas de Informação Geográfica são muito utilizados em estudos ambientais e definiram quatro grandes dimensões de atuação dos SIGs em problemas ambientais, são elas:

- Mapeamento temático - objetiva caracterizar e entender a organização do território como ponto de partida para o estabelecimento das bases para ações e estudos futuros. Ex: levantamentos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e de cobertura vegetal;
- Diagnóstico ambiental - visa à realização de estudos específicos em regiões de interesse para a elaboração de projetos de ocupação ou preservação. Ex: relatórios de impacto ambiental e estudos que objetivam o estabelecimento de áreas de proteção ambiental;
- Avaliação de impacto ambiental - englobam o monitoramento dos resultados da intervenção humana sobre o ambiente de uma dada área.
- Ordenamento territorial - visam criar regras para a ocupação de determinada área, procurando racionalizar a gestão do território, com vistas a um processo de desenvolvimento sustentável.

Ainda sobre as aplicações do SIGs, Celestino e Diniz (1998) afirmam que as aplicações no campo da geologia de engenharia concentram-se em mapeamentos temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análises de risco, avaliação geotécnica e gerenciamento ambiental. Os autores apresentam as vantagens do uso do SIG na elaboração de cartas de geologia de engenharia, são elas:

- Possibilidade de variação nas escalas de trabalho e na recuperação;
- Manipulação de maior número de atributos do meio físico permitindo aquisição, atualização e recuperação em tempo real;

- Simulação interativa da dinâmica de uso do solo e do meio físico ao longo do tempo.

2.5.2 Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto consiste na utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, entre outros, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio do registro e da análise das interações existentes entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes da superfície terrestre em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2004).

Em definições mais recentes, sensoriamento remoto é entendido como um conjunto de técnicas que utiliza sensores para captação e registro da energia refletida ou emitida (radiação eletromagnética) pelos elementos da superfície (ou subsuperfície) terrestre. Estes sensores são responsáveis por transformar a energia eletromagnética em sinal digital (Augusto Filho, 2012).

A faixa de energia eletromagnética denominada espectro eletromagnético abrange, por exemplo, raios-X, raios de luz visível e ondas de rádio. A luz visível, aquela que nossos olhos são sensíveis, tem comprimentos de onda de cerca de 0.4 a 0.7 μm , compreendendo somente uma pequena porção do espectro (GHILANI; WOLF, 2008). Os demais comprimentos de onda captados pelas técnicas de sensoriamento remoto podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 - Espectro eletromagnético captado pelas técnicas de sensoriamento remoto. Fonte: Augusto Filho (2012).

Os diferentes materiais que constituem a superfície terrestre são caracterizados por reflectâncias próprias em cada banda do espectro. A reflectância é proporcional à razão da radiação refletida pela radiação incidente. Quando as respostas espectrais de vários materiais são conhecidas, as propriedades de alvos desconhecidos podem ser determinadas pela comparação das respostas espectrais desses alvos com os dados de referência (SULSOFT, 2013).

Para Augusto Filho (2012), os sensores responsáveis por captar essa energia podem ser classificados em dois grupos, dependendo da fonte de energia (Figura 8), são eles:

- Passivos - captam a energia solar refletida ou a energia refletida por alvos na superfície terrestre. Ex: Sistemas fotográficos;
- Ativos - produzem sua própria radiação. Ex: Radar.

Figura 8 - (a) Exemplo de sensor passivo; (b) Exemplo de sensor ativo.

Os sensores que operam na região ótica do espectro eletromagnético, tais como nas bandas de visível, infravermelho próximo e infravermelho termal, são classificados como sensores óticos, que são sensores passivos. Já os sensores de micro-ondas, que operam na banda de micro-ondas, são considerados ativos (LIU, 2006).

Os sensores ainda podem ser caracterizados, de acordo com Augusto Filho (2012), por quatro parâmetros principais denominados resolução:

- Espacial - menor separação espacial entre dois objetos captada pelo sensor;
- Espectral - número de bandas do sensor e largura de cada banda;
- Radioelétrica (Radiométrica) - número de níveis de cinza usados pelo sensor;
- Temporal - intervalo de tempo entre dois mapeamentos consecutivos.

2.5.2.1 Produtos utilizados para obtenção de informações remotas

2.5.2.1.1 Imagens digitais

As imagens digitais de satélites ambientais, disponíveis comercialmente ou gratuitamente, são utilizadas no monitoramento das evoluções dinâmicas de usos do solo, ecossistemas e dos eventos catastróficos da superfície terrestre (LIU, 2006). Elas são adquiridas a partir de dados de sensoriamento remoto, obtidos por equipamentos sensores acoplados a satélites artificiais lançados na órbita terrestre. O satélite capta a mesma informação de diferentes formas, que é armazenada em bandas. A partir da composição dessas bandas é gerada uma imagem multiespectral (IBGE, 2013).

Imagens digitais são compostas por elementos de imagens, denominados pixels, localizados na interseção de cada linha e coluna de cada banda da imagem. Cada pixel possui um número associado, *Digital Number (DN)*, que representa a radiancia média de uma área relativamente pequena dentro da cena. Um DN menor indica uma média baixa de radiancia na área e um DN maior é um indicador da alta radiancia das propriedades da área (Figura 9). A quantidade de detalhes reproduzidos dentro da cena está diretamente relacionada ao tamanho do pixel, quanto mais reduzido o seu tamanho mais detalhes da cena são apresentados na representação digital (KUMAR), 2004.

Figura 9 - Estrutura de uma imagem digital multiespectral.

De acordo com Sulsoft (2013), as imagens produzidas por sensores remotos, sejam elas fotografias aéreas ou imagens de satélite, apresentam uma série de distorções espaciais, ou seja, não possuem precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos

objetos, superfícies ou fenômenos nelas representados. Esses erros geométricos são resultantes da:

- Rotação da terra;
- Curvatura da terra;
- Movimento do espelho de imageamento;
- Variações da altitude, posição e velocidade da plataforma;
- Distorção de panorama;
- Distorção topográfica.

Outro tipo de distorção que essas imagens possuem é a distorção radial. Na região do centro da imagem o efeito de distorção é quase zero, e esta distorção aumenta radialmente, nas bordas da imagem. Essa distorção radial ocorre porque o centro de perspectiva da imagem não se encontrar no infinito, então a projeção em que esses dados são adquiridos é cônica SULSOFT (2013).

Para corrigir essas distorções, tanto as espaciais quanto as radiais, as imagens devem ser submetidas a um processo de georreferenciamento e ortorretificação.

2.5.2.1.2 Fotografias aéreas

De acordo Bell (2007), a quantidade de informações que podem ser obtidas em fotografias aéreas varia de acordo com a natureza do terreno e o tipo e qualidade das fotografias.

As fotografias aéreas são classificadas de acordo com diversos critérios. Ghilani e Wolf (2008) classificam-nas quanto à geometria, podendo ser:

- Verticais - o eixo da câmara é colocado verticalmente para baixo, ou tão próximo a vertical quanto possível. Uma fotografia aérea verdadeira resulta se o eixo da câmara está exatamente na vertical quando a imagem é capturada. Apesar de todas as precauções, pequenas inclinações, geralmente menores que 1° e raramente maiores que 3° , estão sempre presentes e as fotos resultantes são denominadas quase verticais;

- Oblíquas - o eixo da câmera é intencionalmente inclinado em um ângulo entre a horizontal e a vertical.

A fotografia oblíqua pode ser oblíqua baixa ou alta. A fotografia oblíqua baixa é tomada para um ângulo tal que o horizonte não aparece, já na oblíqua alta o horizonte é incluído (GRAHAM; READ, 1986). Ghilani e Wolf (2008) ainda lembram que as fotografias oblíquas são raramente usadas para aplicações métricas, mas são vantajosas para trabalhos de interpretação e reconhecimento.

Mosaicos de fotografias são adequados para identificar características geológicas regionais e para a identificação preliminar de unidades de terreno. A sobreposição lateral das fotografias origina uma imagem estereoscópica que fornece uma avaliação de terreno mais detalhada (BELL, 2007).

Tommaselli (2012) levanta as condições que devem ser satisfeitas para que duas fotografias formem um par estereoscópio, são elas:

- Devem conter uma área de superposição mínima de 60% entre as fotografias;
- Os eixos das câmaras que formaram o estereopar, no momento da tomada das fotos, precisam estar aproximadamente coplanares;
- A distância entre as estações de exposição (base) não deve ser muito grande em relação à distância câmara-objeto;
- As fotografias devem ter aproximadamente as mesmas escalas, de modo que a variação máxima não ultrapasse 5%.

Existem quatro tipos de filmes usados em fotografias aéreas normais, denominados preto e branco, infravermelho monocromático, cor verdadeira e cor falsa. Os filmes preto ou branco são utilizados para pesquisa topográfica e para finalidades comuns de interpretação. Os outros filmes são utilizados para finalidades específicas (BELL, 2007).

2.5.2.1.3 Ortofotos

De acordo com Ghilani e Wolf (2008) ortofotos são derivadas de fotografias aéreas submetidas a um processo de retificação diferencial que remove variações de escala e deslocamentos da imagem devido ao relevo e à inclinação. Assim, as características fotografadas são vistas em suas posições planimétricas verdadeiras.

A definição de Ghilani e Wolf (2008) pode ser mais bem compreendida por meio da exemplificação de Graham e Read (1986), “uma estrada reta em uma fotografia aérea pode ser visualizada como uma linha curvada, por conta dos deslocamentos devido ao relevo, e em uma ortofoto como uma estrada reta, por ser visualizada em sua projeção verdadeira”.

Ortofotos combinam as vantagens das fotografias aéreas e dos mapas. Como fotografias, elas representam as características em forma de imagens, ao invés de apenas linhas e pontos, facilitando assim o seu entendimento e interpretação. Como mapas, ortofotos representam as características em suas verdadeiras posições planimétricas (GHILANI; WOLF, 2008).

Furquim e Sallem Filho (2002) apresentam outras vantagens das ortofotocartas digitais, são elas:

- Possibilidade de uso em sistemas de informação geográficas;
- Flexibilidade de escalas na saída gráfica;
- Maior facilidade na atualização;
- Mais eficiente, produtivo, flexível e, provavelmente, mais econômico;

2.5.2.2 Obtenção de informações a partir de imagens de satélite, fotografias aéreas e ortofotocartas

Para obtenção de informações espaciais de um determinado local de interesse deve ser lançado mão de procedimentos de classificação, que segundo INPE (2013) é o processo de extração de informação de imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos, que pode ser realizada de forma automática ou analógica.

2.5.2.2.1 Classificação analógica

A classificação analógica de imagens de satélite para obtenção de informações de uso e ocupação do solo é pouco empregada atualmente visto os bons resultados alcançados pelos classificadores automáticos existentes em diferentes softwares. Por outro lado, quando se trata da obtenção de informações em fotografias aéreas a classificação automática torne-se inviável, pois algumas vezes este material apresenta imperfeições

devido à má conservação das fotografias, problemas na captura da imagem e até mesmo na qualidade do filme, resultando em efeitos de vitela, hot spot e marcas de raios de sol que comprometem as informações contidas.

Neste tipo de classificação é comum o uso de técnicas de fotointerpretação. De acordo com Soares e Fiori (1976), este procedimento envolve a identificação do significado dos elementos existentes na imagem, suas funções e relações por meio de métodos indutivos, dedutivos e comparativos. Entretanto a fotointerpretação é a última das etapas, pois outras que devem ser realizadas anteriormente. Inicialmente é realizada a fotoleitura que deve buscar reconhecer e identificar os objetos e feições existentes na imagem e posteriormente, a fotoanálise para separar e individualizar por meio de associações os objetos identificados na fotoleitura.

O processo de fotointerpretação é facilitado por elementos de interpretação de imagens, como tamanho, forma, tonalidade, cor, textura, padrão e sombra, de modo que as diferenças desses elementos podem ser amplificadas por propriedades da visão estereoscópica de esteopares de fotografias aéreas.

2.5.2.2.2 Classificação Digital

A classificação digital é realizada por meio de algoritmos computacionais de classificações tradicionais, ou ainda por algoritmos da classificação orientada a objetos. Esses diferentes tipos de classificações estão presentes hoje tanto em softwares de domínio público quanto comerciais.

Classificações tradicionais

Na classificação tradicional a imagem é classificada pixel a pixel, utilizando como critério apenas a resposta espectral dos materiais imageados e a condição de que cada pixel pertence a uma única classe (BELTRAME, 2008).

De acordo com Liu (2006), os métodos de classificação são agrupados em duas categorias, classificação não supervisionada e classificação supervisionada. A classificação não supervisionada é baseada na análise de agrupamento, usando critérios estatísticos dos dados de amostragem, sendo os algoritmos mais usados neste método o ISODATA e o K-Means. No método de classificação supervisionada também são utilizadas funções

estatísticas para analisar e comparar as características das reflectâncias espectrais dos pixels com as características de uma determinada classe de padrão para classificar e delinear as classes das imagens digitais. Diferentemente da classificação não supervisionada que possui poucos algoritmos, a classificação supervisionada inclui uma grande variedade, máxima verossimilhança, paralelepípedo, redes neurais artificiais e outros.

Classificação orientada ao objeto

Na classificação orientada ao objeto utiliza-se além da informação espacial de cada pixel, a informação espacial que envolve a relação com seus vizinhos. Procura-se simular o comportamento do foto-intérprete, reconhecendo-se áreas homogêneas da imagem baseado nas suas propriedades espectrais e espaciais (INPE, 2013). Todavia, a classificação orientada ao objeto demanda um processo antecedente, a segmentação (BELTRAME, 2008).

A segmentação é o processo de divisão da imagem em segmentos pelo agrupamento de pixels vizinhos com características estatisticamente similares (brilho, textura, cor, etc). Durante este processo devem ser definidos pelo usuário dois parâmetros: Nível de escala (*Scale Level*) e Nível de União (*Level Merge*) (ENVI, 2008).

O nível de escala adotado deve procurar dividir a imagem de acordo com mudanças bruscas nos níveis de cinza, que podem ser detectadas com base em pontos ou linhas isolados ou ainda pela forma mais utilizada, bordas de imagem (BELTRAME, 2008). Ao suprimir ou separar bordas que apresentam diferentes níveis de cinza, o algoritmo pode produzir resultados de segmentação de escala fina à grosseira (ENVI 2008).

Após a seleção do melhor nível de escala a imagem é segmentada e um novo parâmetro pode ser utilizado para melhorar a segmentação, o nível de união. ENVI (2008) descreve que este parâmetro agrega pequenos segmentos, como por exemplo, árvores dentro de áreas maiores onde a aplicação do nível de escala pode ser um problema.

A combinação destes parâmetros determina diferentes resultados com priorização de diferentes características dos objetos segmentados, por isso vários testes devem ser realizados em busca da combinação que resulta no melhor nível da segmentação da imagem de acordo com a destinação do produto final.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Parque Nacional Serra da Canastra (PNSC) está localizado no sudeste de Minas Gerais e abrange, parcialmente, seis municípios, a saber: São Roque de Minas, Sacramento, Delfinópolis, São João Batista do Glória, Capitólio e Vargem Bonita. A área total do PNSC é de 197.787ha, entretanto a área regularizada com situação fundiária compreende apenas 71.525ha, os outros 126.262ha compreendem a área não regularizada.

A área de estudo envolve parte da área não regularizada do PNSC, abrangendo parcialmente os municípios de Delfinópolis, São Roque de Minas e São João Batista do Glória, totalizando uma área de 94.354 ha (Figura 10).

Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo.

O acesso à área de estudo é feito por via terrestre, utilizando importantes rodovias que ligam as principais capitais da região sudeste, como pode ser visualizado na Figura 11.

Apesar de se enquadrarem como rodovias, muitas apresentam precárias condições de manutenção, consistindo em trechos sem pavimentação asfáltica, principalmente nas proximidades da área, tanto no sentido de Belo Horizonte quanto de São Paulo.

Figura 11 - Localização da área de estudo e principais vias de acesso pela região sudeste.

3.1 Socioeconomia

A área de estudo está totalmente localizada na área rural, apesar da proximidade com centros urbanos, Delfinópolis e São João Batista do Glória e pequenos distritos, São José do Barreiro, Olhos d'água. Segundo IBGE (2010), os municípios de São João Batista do Glória e Delfinópolis são municípios pouco populosos, 6.887 e 6.830 habitantes, respectivamente, enquanto a população de Sacramento é de 23.896 habitantes.

A economia está principalmente voltada para a agropecuária e ecoturismo, de acordo com o IBGE (2006) as atividades agropecuárias ocupam uma grande parte da área dos municípios de Delfinópolis e São João Batista do Glória, 39% e 42%, respectivamente, por pastagens plantadas e naturais e culturas temporárias e permanentes. As atividades ecoturísticas lucrativas são desenvolvidas devido à expressiva beleza cênica da área, e

também pela proximidade da hidrelétrica de Furnas e reservatório da hidrelétrica Mascarenhas de Moraes, sendo voltadas principalmente ao ramo de hospedagem tanto na área de estudo quanto nas áreas urbanas próximas. As demais atividades ecoturísticas, offroad, trekking, rapel, banho de cachoeira e mountain bike apesar de serem intensamente exploradas não geram na maioria das vezes lucros diretos.

A mineração de quartzito é uma atividade muito expressiva dentro da área de estudo, tanto pela quantidade de cavas a céu aberto quanto pelo impacto negativo ao meio físico, porém quase todas as minerações existentes estão embargadas por órgãos ambientais.

3.2 Vegetação

O Parque Nacional Serra da Canastra está inserido no domínio fitogeográfico do cerrado com predomínio das formações vegetais do tipo campo (limpo e sujo) e campo rupestre, conforme figura 12 (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2014).

Figura 12 - Mapeamento da cobertura vegetal referente a 2009. Fonte: Scolforo, Oliveira e Carvalho (2014).

O campo limpo apresenta poucos arbustos, ausência de árvores e é predominantemente herbáceo, podendo ser seco ou úmido dependendo do nível do lençol freático. Quando úmido pode estar associado ao campo rupestre que é um tipo fisionômico herbáceo- arbustivo, em sua maioria, com presença de arvoretas pouco arbustivas. Assim como o campo rupestre, o campo sujo é também do tipo herbáceo-arbustivo, porém com presença de arbustos e subarbustos esparsos (IBAMA, 2005).

Nas linhas de drenagens e suas proximidades percebe-se a existência de uma vegetação mais desenvolvida caracterizada por Scolforo, Oliveira e Carvalho (2014) como floresta estacional semidecidual montana. Para IBAMA (2005), a floresta estacional semidecidual montana é característica de encostas, se estendendo até o início do canal de drenagem onde é substituída pela floresta estacional semidecidual aluvial inundável ou não inundável.

3.3 Clima

O clima apresenta grande sazonalidade, com verão chuvoso e inverso seco. A temperatura média anual fica em torno de 22-23° C e a precipitação média anual entre 1.200 e 1.800 mm, concentrando-se nos meses de primavera e verão (outubro a março) (IBAMA, 2005).

3.4 Recursos hídricos

A área de estudo integra a unidade de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos de Minas Gerais GD7, fazendo divisa com a SF1 que integra a bacia hidrográfica do rio São Francisco. A unidade GD7 faz parte da bacia hidrográfica do rio Grande, localizada entre os estados de Minas Gerais e São Paulo e integra a região hidrográfica do Paraná (Figura 13).

Para IBAMA (2005) os padrões da rede de drenagem da região são fortemente influenciados pelos sistemas de contatos litológicos, destacando dois padrões de controle dos lineamentos: os que coincidem com as estruturas geológicas paralelas aos contatos entre xistos e quartzitos, associados aos traços de drenagem com direção NW/SE e os que coincidem com as juntas, ocupando as direções ortogonais aos canais de primeira ordem, principalmente nas direções NE/SW.

Figura 13 - Localização da área de estudo em relação às bacias hidrográficas federais e unidades de planejamento de Minas Gerais.

3.5 Geologia e geomorfologia

As rochas da área de estudo pertencem basicamente aos Domínios Interno e Externo da Faixa Brasília, próximo ao limite com o Cratón do São Francisco, com pequenas ocorrências de coberturas quaternárias. As rochas do Domínio Interno são atribuídas ao Grupo Araxá, Setor Nappe de Passos, enquanto que as pertencentes ao Domínio Externo são atribuídas ao Grupo Canastra, Setor Sul e Setor Serra da Canastra (SIMÕES et al., 2008). De forma geral, o substrato rochoso está relacionado principalmente às unidades de quartzito e xisto (Figura 14).

Figura 14 - Mapa de substrato rochoso da área de estudo. Fonte: Modificado de Gomes e Collares (2010a).

De acordo com o plano de manejo do PNSC (IBAMA, 2005), existe uma sequência mais ou menos repetitiva dos níveis de rochas mais compactas com as de menor grau de coesão, notando-se uma gradação positiva entre a relação dos níveis de rochas à medida que se elevam as cotas altimétricas. Desta forma, observa-se uma tendência dos pacotes de rochas menos compactas constituírem os vales e porções mais baixas do relevo, Vale dos Cândidos e Vão da Guarita, enquanto que os platôs, serras e contrafortes (hogbacks) são constituídos por rochas de maior coesão (Figura 15).

Figura 15 - Croqui da relação rocha x relevo na região. Fonte: Pessoa (2002) apud IBAMA (2005).

De acordo com Magri (2013) a área pode ser compartimentada em seis unidades de relevo (Figura 16).

Figura 16 - Mapa de landforms. Fonte: Modificado de Magri (2013).

A unidade de relevo mais representativa consiste de serras que apresentam, em sua maioria, amplitudes altimétricas em torno de 300 a 440 metros, declividades elevadas e se

diferenciam pelo substrato rochoso que as sustentam. As serras formadas pelos quartzitos e xistos do Grupo Araxá apresentam topos angulosos e extensos, vales fechados e média frequência de canais, enquanto que as serras sustentadas por quartzitos do Grupo Canastra apresentam topos com formas variadas, encostas retilíneas e vales encaixados. Os morros caracterizam-se na maior parte por amplitudes altimétricas de até 300m, topos angulosos, vales fechados e alta frequência de canais. As demais unidades, colinas, vales, morrotes e planícies se mostram menos representativas na área.

3.6 Materiais inconsolidados

Quanto aos materiais inconsolidados encontrados na área de estudo observa-se na sua maioria a ocorrência das unidades de 3, 4 e 1 (Quadro 3 e Figura 17). O perfil do solo na unidade 3 é pouco espesso, constituído por um solo maduro arenoso, atingindo a rocha a menos de 1 m. Os solos saprólitos arenosos predominam na unidade 4, sobrepostos por solos maduros, também, arenosos. Na unidade 1, ocorre o predomínio de solos saprólitos com textura siltosa e saprolíticos silto-argilosos recobertos por solo maduro silto-argiloso.

Figura 17 - Mapa de materiais inconsolidados. Fonte: Modificado de Magri (2013).

Unidade	Descrição
Unidade 1	Predomínio de solos saprólitos com textura siltosa e saprolíticos silto-argilosos, recobertos por solo maduro silto-argiloso.
Unidade 2	Textura bastante variável, resultado dos processos de deposição fluvial.
Unidade 3	Solo maduro pouco espesso de textura arenosa.
Unidade 4	Predomínio de solo saprólito arenoso sobreposto por solo maduro arenoso.
Unidade 5	Predomínio de solo maduro silto-argiloso sobreposto por solo saprolito siltoso.
Unidade 6	Solo saprolito siltoso pouco espesso.
Unidade 7	Predomínio de solo maduro com textura bastante arenosa e saprolito siltoso. Entre os dois níveis, ocorre o saprolítico areno-siltoso.
Unidade 8	Predomínio de solo maduro areno-argiloso e saprolito silto-arenoso. Entre os dois níveis ocorre o solo saprolítico constituído por uma argila areno - siltosa.
Unidade 9	Solo maduro silto - argiloso e solo saprolito silto-arenoso. Predomínio do solo saprolítico areno-siltoso.
Unidade 10	Predomínio de solo maduro com textura argilo-silto-arenosa e solo saprolito silto-arenoso. Entre os dois níveis encontra-se o solo saprolítico areno-siltoso.

Quadro 3 - Descrição simplificada das unidades de materiais inconsolidados. Fonte: Modificado de Magri (2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As imagens de satélite, fotografias aéreas, documentos cartográficos existentes, softwares e equipamentos utilizados nessa pesquisa apresentam-se listados a seguir:

➤ Imagens de satélite

a) Imagem ALOS datada de 2009, multiespectral (12,5 x 12,5m), fusionada com a banda pancromática (2,5 x 2,5m) para obtenção de uma resolução espacial 2,5 x 2,5m;

a) Imagens do Google Earth Pro.

➤ Fotografias aéreas

a) 36 fotografias aéreas verticais (USAF) pancromáticas datadas de 1964 a 1967, na escala 1:60.000;

b) 63 ortofotocartas digitais (CEMIG) pancromáticas datadas de 1989, na escala 1:10.000;

c) 171 fotografias aéreas verticais (CEMIG) pancromáticas datadas de 1985/1987/1989, na escala 1:30.000.

➤ Documentos cartográficos

a) Cartas topográficas na escala 1:50.000 produzidas pelo IBGE, são elas:

- Chapadão da Zagaia (SF-23-V-A-III-1);
- Delfinópolis (SF-23-V-A-III-3);
- Furnas (SF-23-V-B-IV-1);
- Passos (SF-23-V-A-VI-2);
- Serra da Canastra (SF-23-V-A-III-2);
- Serra da Guarita (SF-23-V-A-III-4) e

- Vargem Bonita (SF-23-V-B-I-3).

b) Mapa geológico, na escala 1:100.000, elaborado por Gomes e Collares (2010a), a partir da compilação e verificação em campo dos seguintes mapas geológicos:

- Folha de Delfinópolis - SF-23-V-A-III, na escala 1:100.000, produzido pela UNESP e disponibilizado pelo CPRM (2008);
- Folha de Alpinópolis - SF23-V-B-IV, na escala 1:100.000, produzido pela UERJ e disponibilizado pelo CPRM (2005);
- Folha de São Sebastião do Paraíso - SF.23-V-A-VI, na escala 1:100.000, produzido pela UNESP e disponibilizado pelo CPRM (2006);
- Mapa geológico de Minas Gerais, na escala 1:1.000.000 (COMIG, 1994).

c) Mapa de uso e ocupação do solo, referente ao ano de 2009 (Dias, 2013a);

d) Cartas climáticas (Radiação solar global mensal, deficiência hídrica mensal, evapotranspiração potencial mensal, mapas de chuvas intensa com duração de 24 horas em 2, 10, 25, 50 e 100 anos de período de retorno, mapa de pluviosidade total do trimestre chuvoso (Dias, 2013a e 2013b);

e) Mapa de *landforms* (Magri, 2013);

f) Carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial (Dias, 2013a);

g) Mapa de materiais inconsolidados (Magri, 2013);

h) Rede de drenagem digitalizada (Gomes e Collares, 2010b);

i) Curvas de nível com equidistância de 20 metros e pontos cotados digitalizados (Magri, 2013);

j) Carta de suscetibilidade à erosão (Magri, 2013);

l) Pontos turísticos georreferenciados (Carvalho, 2012).

Os documentos dos itens b, c, d, e, f, g, h, i e j, l foram disponibilizados pelos autores citados e pela Fundação de Ensino Superior de Passos-MG, que realizou por meio do Projeto Grande Minas o zoneamento ambiental das sub-bacias hidrográficas dos afluentes mineiros do Médio Rio Grande (GD7). O Projeto Grande Minas desenvolveu estudos sobre o meio físico, biótico e socioeconômico da região, que também engloba a área de estudo.

➤ Softwares

- b) ArcGIS10.1;
- c) ENVI 4.7.

➤ Equipamentos

- a) GPS de navegação;
- b) Máquina fotográfica;
- c) ScanMaker 9800XL Microtek;
- d) Estereoscópio de espelho;
- d) Bússola.

4.2 Aspectos metodológicos

As principais atividades desenvolvidas e produtos cartográficos elaborados neste trabalho são apresentados no fluxograma da Figura 18. Os produtos cartográficos foram elaborados na escala 1:50.000.

Vale ressaltar que os produtos destacados em verde referem-se a trabalhos de outros autores, citados no item 4.1, que foram considerados devido à sua importância na análise.

Figura 18 - Fluxograma envolvendo as etapas adotadas no desenvolvimento desta pesquisa.

4.2.1 Elaboração da base cartográfica: georreferenciamento e mosaicagem

4.2.1.1 Cartas topográficas

As cartas topográficas referentes à área de estudo foram devidamente georreferenciadas e mosaicadas no software ENVI 4.7. A Figura 19 apresenta o mosaico de cartas topográficas que foi utilizado como referência para vários procedimentos realizados nesse trabalho, como o georreferenciamento das fotografias aéreas e ortofotocartas.

Figura 19 - Base topográfica da área de estudo.

4.2.1.2 Fotografias aéreas

As fotografias aéreas pancromáticas referentes ao período 1964/1967, escala 1:60.000, foram disponibilizadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e são resultado do levantamento realizado pela Força Aérea dos Estados Unidos (USAF).

Inicialmente as fotografias em papel foram transformadas para o formato digital por meio da sua escanerização no scanner Scanmaker9800xl, com o auxílio do software Scanwizard Pro V7.26 (resolução de 1200 dpi e tipo *gray scale*).

Para a realização do georreferenciamento das fotografias aéreas foi utilizado o software ENVI 4.7. Primeiramente, cada fotografia foi importada para o software juntamente com o mosaico das cartas topográficas, previamente georreferenciadas, que foi utilizado como referência para o georreferenciamento. Para a aquisição de pontos de controle buscaram-se em ambas as imagens pontos comuns, como cruzamentos de estradas e confluências de rios.

Após o georreferenciamento de todas as fotografias aéreas, construiu-se o mosaico. Como as fotografias apresentavam contrastes diferentes, optou pela utilização da ferramenta *Color Balancing*, que compatibiliza a estatística do histograma de uma determinada imagem com as outras que se deseja que assumam o mesmo padrão de cor da imagem fixada (Figura 20).

Figura 20 - Mosaico de fotografias aéreas.

4.2.1.3 Ortofotocartas

As ortofotocartas referentes ao ano de 1989, escala 10.000, foram adquiridas em formato digital da Companhia energética de Minas Gerais (CEMIG). Estas ortofotocartas foram elaboradas na sua maioria pela empresa ESTEIO Engenharia e aerolevantamentos S.A., sendo algumas elaboradas pela Aerodata.

Para o georreferenciamento, cada ortofocarta foi importada para o software ENVI 4.7. Como as ortofotocartas possuíam grade de coordenadas não foi necessário utilizar as cartas topográficas para obter pontos de controle para o georreferenciamento, os pontos puderam ser obtidos nos cruzamentos da própria grade.

Assim como as fotografias aéreas, as ortofotocartas foram mosaicadas e aplicado o balanceamento de cores, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Mosaico de ortofotocartas.

4.2.2 Levantamentos básicos

4.2.2.1 Vias de acesso

Foi realizado o levantamento da evolução temporal da implantação de vias de acesso de 1989 a 2009, não sendo possível realizar este levantamento para 1964/ 1967 devido à escala das fotografias aéreas. As vias de acesso desses períodos foram digitalizadas utilizando o software ArcGIS 10.1. A identificação das vias referentes a 1989 foi realizada pela fotoanálise das ortofotocartas, enquanto que as vias atuais (2009) foram levantadas sobre as imagens de satélite Alos e imagens recentes do Google Earth Pro com melhor resolução espacial, que auxiliaram a fotoanálise das imagens Alos para digitalização das trilhas que apresentavam leito mais estreito.

Posteriormente, as vias de acesso foram classificadas de acordo com os critérios do Manual de Abreviaturas, Siglas, Símbolos e Convenções Cartográficas das Forças Armadas - MD33-M-02 (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2008). Nesta classificação as vias recebem diferentes denominações em relação à possibilidade de tráfego que oferecem, ao número de faixas e ao tipo de revestimento.

4.2.2.2 Pontos de interesse turístico

O levantamento de áreas de interesse para o turismo (ex: pousadas e cachoeiras) foi realizado em três etapas, são elas:

- Compilação e averiguação dos dados existentes: A compilação dos dados existente no banco de dados do Projeto Grande Minas e em prefeituras e entidades relacionadas ao turismo mostrou que alguns pontos apresentavam informações incompletas e necessitavam ser melhor investigados em campo;
- Levantamento de novos pontos em imagens de satélite: Realizou-se uma busca nas imagens Alos (2009) e em imagens recentes do Google Earth Pro de áreas que potencialmente podiam representar interesse para a pesquisa;
- Levantamento de campo: O levantamento de campo objetivou coletar dados tanto dos pontos levantados em trabalhos já existentes que apresentam informações incompletas quanto das novas áreas levantadas nas imagens de satélite.

4.2.3 Elaboração de produtos cartográficos básicos

4.2.3.1 Mapa de uso e ocupação do solo

Os mapas de uso e ocupação do solo foram elaborados para três períodos diferentes, os mapas de 1964/1967 e 1989 foram elaborados integralmente pelo autor e o no mapa de 2009, elaborado por Dias (2013a), foram realizadas apenas correções a fim de adequá-lo à escala deste trabalho. As classes adotadas para classificação das fotografias aéreas e ortofotocartas foram baseadas no trabalho de Dias (2013a), Quadro 4.

Classes de cobertura do solo	Imagem de satélite Alos (2009)
Mata
Campo arbustivo
Campo
Silvicultura

Quadro 5 -Tipos de uso e ocupação do solo levantados na área de estudo (*continua*).

Classes de cobertura do solo	Imagem de satélite Alos (2009)
Pastagem
Cultura permanente
Cultura anual
Solo exposto
Mineração
Erosão

Quadro 4 -Tipos de uso e ocupação do solo levantados na área de estudo (*conclusão*).

As metodologias adotadas para a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo para os dois períodos 1964/1967 e 1989 não foram iguais, visto que os produtos fotográficos utilizados possuem qualidades bem distintas. As fotografias aéreas apresentavam reflexos de sol, hot spot e efeitos de vitela que comprometeram as informações contidas, inviabilizando a aplicação de classificadores automáticos de imagens. Por outro lado, as ortofotocartas constituem um produto mais uniforme, porém ainda com algumas irregularidades como pode ser observado na Figura 22. Algumas ortofotocartas apresentavam contrastes diferentes em alvos iguais, o que provavelmente foi decorrente da mosaicagem de fotografias aéreas de contrastes diferentes durante a elaboração da ortofotocarta. Apesar dessa irregularidade, foi possível aplicar um classificador automático de imagens. A classificação automática objetivou separar apenas a classe mata das demais classes, pois estas ocupam uma pequena porção da área de estudo e por isso optou-se por digitaliza-las manualmente.

Figura 22 - Exemplo da diferença de contraste em alvos iguais nas ortofotocartas de 1989.

Uma descrição mais detalhada da metodologia adotada para a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo de 1964/1967, 1989 e 2009 pode ser observada na Figura 23 e nos itens a seguir.

Figura 23 - Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo.

4.2.3.1.1 Mapa de uso e ocupação do solo 1964/1967

Para a obtenção do mapa de uso e ocupação do solo do período 1964/1967 optou-se pela digitalização analógica das classes de uso e ocupação do solo, devido aos problemas com a qualidade das fotografias aéreas citados anteriormente. Atualmente, existem recursos disponíveis para a correção desses problemas, porém eles demandariam muito tempo e programas específicos não disponíveis.

As classes foram então digitalizadas utilizando o software ArcGIS 10.1. Nas regiões onde apenas a fotoanálise não permitia a identificação do alvo, foi realizada a fotointerpretação dos pares estereoscópios que compunham a área com o auxílio do estereoscópio de espelho.

4.2.3.1.2 Mapa de uso e ocupação do solo 1989

4.2.3.1.2.1 Segmentação

A segmentação consistiu na divisão das ortofotocartas em diversos segmentos formados por diferentes conjuntos de pixels estatisticamente similares. Este processo ocorreu de forma descontínua, ou seja, não se segmentou todo o mosaico de ortofotocartas no mesmo momento e sim porções de cada ortofotocarta, devido à extensão da área de estudo e ao problema observado na Figura 22, algumas ortofotocartas apresentavam contrastes diferentes em alvos iguais. Além disso, a segmentação de todo mosaico no mesmo momento demandaria um elevado tempo de processamento e dificultaria a inspeção da qualidade dos parâmetros adotados na segmentação.

Durante o processo de segmentação foram testados diferentes valores para os parâmetros *Scale Level* e *Merge*, a fim de estabelecer os que apresentavam melhores resultados para a identificação da classe mata (Figura 24 e 25).

Figura 24 - Tela de definição do *Scale Level*.

Figura 25 - Tela de definição do *Level Merge*.

4.2.3.1.2 Classificação

O método de classificação *Rule - Based Classification* presente no software ENVI EX permite definir características por intermédio do estabelecimento de regras sobre os atributos do objeto de interesse. Estes atributos podem ser espaciais, espectrais e relacionados à textura, disponíveis tanto para imagens pancromáticas quanto multiespectrais, e atributos de *color space* e *band ratio*, associados apenas às imagens multiespectrais.

A construção das regras para a classificação baseou-se na seleção de atributos que separavam a classe mata das demais classes indesejadas. Como as ortofotocartas consistem em imagens pancromáticas, estavam disponíveis para a criação de regras apenas os atributos espaciais, espectrais e os relacionados à textura. Os atributos de textura não se mostraram eficientes na filtragem da classe mata, pois outras feições apresentavam texturas semelhantes, enquanto que os espectrais e espaciais mostraram melhores resultados. Dentre os espectrais, o que se mostrou mais adequado foi o AVGBAND, que é o valor médio dos pixels contidos em uma região (segmento), enquanto que dentre os espaciais, o atributo ÁREA se mostrou muito hábil na criação das regras, pois apenas segmentos de mata com áreas maiores foram filtrados, a fim de evitar uma grande quantidade de ruídos na classificação final (Figura 26). Somente estes dois atributos foram utilizados para a criação de regras na classificação das ortofotocartas, porém o intervalo

do histograma de cada atributo variou de uma ortofotocarta para outra, devido às diferentes características da área abrangida.

Figura 26 - Tela de definição das regras de classificação.

4.2.3.1.2.3 Pós classificação

Após a segmentação e a classificação baseada em regras, os arquivos gerados foram refinados por ferramentas de pós classificação no ENVI 4.7. Este refinamento objetivou homogeneizar o resultado da classificação eliminando ruídos e alguns fragmentos de mata que foram erroneamente classificados.

Inicialmente foram utilizadas as funções *clump* e *sieve* que possibilitam aglutinar e separar pixels isolados envoltos ou próximos aos grupos de pixels da classe mata. Estas funções apresentam opções de tamanho de máscara a serem utilizados, assim diversos valores tiveram que ser testados a fim de encontrar o que melhor se ajustava às características da área abrangida por cada ortofotocarta.

Para o refinamento final, utilizou-se a ferramenta *classedit* que permite a manipulação ponto a ponto da imagem, possibilitando ao operador a correção de áreas que foram interpretadas erroneamente nos processos de classificação e refinamento.

4.2.3.1.2.4 Digitalização analógica das demais classes

Com exceção da classe mata, classificada na etapa anterior, as demais classes foram digitalizadas utilizando o software ArcGIS 10.1, são elas: campo, campo arbustivo, silvicultura, culturas, pastagem, solo exposto, mineração e erosão. Nas regiões em que apenas a fotoanálise não permitia a identificação do alvo, foi realizada a fotointerpretação dos pares estereoscópios das fotografias aéreas de 1989, que subsidiaram a elaboração das ortofotocartas pela empresa ESTEIO.

4.2.3.1.2.5 Sobreposição e quantificação das classificações

A sobreposição das classes do mapa de uso e ocupação do solo mapeadas pelos métodos analógico e digital deu-se lançando mão da ferramenta *merge* presente no software ArcGIS 10.1. Em seguida, foi realizada a quantificação de área dos mapas de cobertura de solo de 1964/1967, 1989 e 2009 também no Arcgis 10.1.

4.2.3.2 Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) e Carta de Declividade

O MDEHC foi elaborado a partir da interpolação de informações de relevo e hidrografia (curvas de nível com equidistância de 20 metros, pontos cotados e rede de drenagem), utilizando a ferramenta *Topo to Raster* presente na extensão *3D Analyst Tools* e adotando o tamanho do pixel de saída igual 10. Visando um melhor ajuste do modelo na borda da área de estudo, as informações de relevo e hidrografia abrangiam um buffer de 1500 metros no entorno da área.

A ferramenta *Topo to Raster* é um método de interpolação especificamente designado para a criação de modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes, visto que é baseado nos princípios desenvolvidos por Michael Hutchinson (1988, 1989, 1996, 2000, 2011) (ESRI, 2014a). Os modelos digitais hidrologicamente consistentes além de representar o relevo devem garantir a convergência do escoamento superficial para as drenagens mapeadas.

Buscando identificar e corrigir possíveis anomalias na consistência hidrológica do MDEHC, este foi importado para o software ENVI 4.7 IDL. Por meio da rotina HAND

integrada ao software, que será explicada detalhadamente no item 4.2.4.5.1, foram realizadas correções automáticas no MDEHC e novos produtos foram gerados para verificar a consistência da rede de drenagem a partir do modelo corrigido.

A Figura 27 ilustra o procedimento de correção automática e elaboração de modelos de direção de fluxo e área acumulada para geração da rede de drenagem numérica. Vale lembrar que para a geração da rede de drenagem buscou-se considerar uma área acumulada, ou seja, um número de pixels que convergiam para os pontos indicados na direção de fluxo, semelhante ao nível de detalhe da rede de drenagem original.

Com a obtenção da rede de drenagem, realizou-se uma comparação visual entre a rede de drenagem original, vetorizada das cartas topográficas, e a gerada. No caso das divergências ainda encontradas, os arquivos referentes às curvas de nível, drenagem e pontos cotados foram corrigidos manualmente quanto à direção de fluxo. Com a base topográfica corrigida, um novo modelo digital de elevação foi elaborado no software ArcGIS 10.1 e mais uma vez os procedimentos para geração da rede de drenagem foram executados no software ENVI 4.7 IDL para verificar novamente a sua consistência hidrológica.

Ainda objetivando validar o modelo, foram geradas curvas de nível pela ferramenta *Countour* presente na extensão *Spatial Analyst* a partir do MDEHC corrigido. Segundo Hutchinson e Gallant (2000) a geração de curvas de nível do MDEHC é uma boa forma de conferir a sua consistência hidrológica. Assim, realizou-se uma comparação visual entre as curvas de nível originais, vetorizadas das cartas topográficas, com as derivadas do MDEHC para detectar a presença de anomalias.

Com a obtenção do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente, a carta de declividade foi elaborada utilizando o comando *Slope*, presente extensão *3D Analyst*.

Figura 27 - Procedimentos para correção de modelo digital de elevação por meio de ferramentas disponíveis na rotina HAND. Fonte: Adaptado de Nobre et al. (2011).

4.2.3.3 Análises de densidade e distância

4.2.3.3.1 Densidade de vias de acesso e canais de drenagem

A elaboração de grades de densidade de vias de acesso e canais de drenagem foi realizada por meio da ferramenta *Kernel Density* presente na extensão *Spatial Analyst* do software ArcGIS 10.1.

O estimador de densidade kernel pode ser aplicado tanto em dados pontuais quanto lineares (Figura 28). Um raio de pesquisa é ajustado a cada ponto de amostragem ou linha formando uma superfície circular suavemente côncava e então uma função matemática é aplicada. Sobre cada linha ou ponto, representado pelo topo da superfície côncava, é adotado o valor 1 (maior densidade), que vai diminuindo ao distanciar-se até a base da superfície, onde o valor é 0 (menor densidade). Desta forma, a densidade de cada célula da grade é estimada pela soma de todas as superfícies *kernel* que a sobrepõem.

Figura 28 - Esquema ilustrativo de cálculo de densidade de pontos pela ferramenta *Kernel Density*.

O raio de pesquisa é uma variável que exerce grande influência sobre o resultado final, visto que quanto maior o raio mais achatada é a superfície côncava do kernel, portanto, vários raios foram testados, 800m, 1000m, 1500m e 2000m, a fim de encontrar o que mais se adequava a escala do trabalho e às finalidades do documento produzido. Por fim, foram realizadas análises de frequência de canais de drenagem, densidade de vias de acesso (total e por tipos de vias) e densidade de confluências de canais de drenagem com vias de acesso (por tipos de vias e ordem hierárquica dos canais) considerando um raio de pesquisa igual a 800 m.

Para a identificação de confluências de canais de drenagem com vias de acesso foi utilizada a ferramenta *Intersect* presente na extensão *Analysis Tools* do software ArcGIS 10.1, considerando PONTOS como tipo de arquivo de saída (Figura 29). Em seguida, foi necessário desagregar os *layers* dos pontos gerados para possibilitar a contabilização automática do número de confluências entre as diferentes ordens dos canais de drenagem e tipos de vias de acesso.

Figura 29 - Exemplo de localização das confluências entre rodovias de tráfego periódico e canais de drenagem de 1º ordem.

4.2.3.3.2 Distância real entre rede de drenagem e vias de acesso

É comum encontrar trabalhos que calculam faixas de distâncias horizontais a partir dos canais de drenagem, por meio da ferramenta *buffer* presente na maioria dos SIGs. Porém, esta ferramenta apresenta bons resultados apenas em regiões de relevo plano, com o aumento das variações altimétricas as medidas de distâncias horizontais passam a ser muito inferiores às distâncias reais, como é o caso de área de estudo. Assim, optou-se pelo

uso de ferramentas mais sofisticadas do software ArcGIS 10.1, juntamente com a adoção dos princípios básicos do triângulo retângulo.

Para obter os valores da hipotenusa de cada pixel, ou seja, a sua distância real, criou-se uma grade com resolução 10x10 para representar o cateto adjacente, enquanto que o ângulo α de cada pixel foi entendido como a declividade. Com os valores de cateto adjacente e α calculou-se a hipotenusa de cada pixel pela ferramenta *Map Algebra*. Para utilizar o valor da declividade na operação foi necessário convertê-lo para radiandos, visto que neste tipo de operação o ArcGIS 10.1 trabalha apenas com números inteiros (Equação 2).

$$\alpha (rad) = \alpha (^{\circ}) \cdot 0,0174532925$$

Equação 2

De posse do *raster* contendo os valores referentes à hipotenusa de cada pixel, o próximo passo foi encontrar as faixas de distância a partir dos canais de drenagem por meio da ferramenta *Cost Distance*, que calcula a menor distância de custo acumulada de cada pixel para o pixel mais próximo a partir de um pixel de origem, no caso, a origem é a dada pela rede de drenagem e o custo pelos valores da hipotenusa.

As faixas de distância foram então reclassificadas de acordo com Brasil (2012) e Catelani, Batista e Targa (2005). Com as faixas obtidas separadamente para canais de 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª calculou-se a percentagem de extensão de vias de acesso inseridas dentro de cada faixa.

4.2.4 Documentos interpretativos

4.2.4.1 Carta de restrição à implantação de vias

A elaboração desse produto cartográfico teve como objetivo identificar áreas com baixa densidade de vias de acesso e alta frequência de canais de drenagem, onde a implantação de vias pode condicionar impactos mais intensos que em áreas de baixa densidade de drenagem, devido ao maior número de confluências gerado. Outros processos, como movimentos de massa, erosão e inundação, importantes em análises de restrições serão avaliados separadamente e posteriormente combinados em um produto final.

Foram sobrepostas classes específicas das cartas de frequência de canais e densidade de vias de acesso por meio da ferramenta *Map algebra* presente na extensão *Spatial Analyst* do software ArcGIS 10.1, não atribuindo importância (pesos) diferente aos atributos e às classes.

4.2.4.2 Carta de predisposição a movimentos de massa

A metodologia utilizada buscou mapear tipos específicos de movimentos de massa característicos da área de estudo, queda e tombamento de blocos e escorregamento em talus. A carta foi elaborada no software ArcGIS 10.1 com auxílio da ferramenta *Map algebra* pela sobreposição simples, sem ponderação de pesos, de unidades geológicas e classes de declividade identificadas em campo como predisponentes ao desencadeamento desses tipos de movimentos. Juntamente com as observações de campo, a definição das classes de declividade foi baseada no estudo de Burkalow (1945), que combinou diferentes fatores que influenciam o ângulo de repouso e estabeleceu intervalos de inclinação em que este ângulo é ultrapassado.

Após a sobreposição dos atributos, foi realizado um refinamento para agregação de pequenas áreas contidas em polígonos maiores e eliminação de áreas isoladas que eram muito pequenas e não apresentavam uma predisposição real a estes movimentos de massa.

4.2.4.3 Carta de trafegabilidade

A carta de trafegabilidade foi desenvolvida de acordo com os princípios metodológicos adotados por diversos autores expostos na revisão bibliográfica (item 2.2.3). Não foram consideradas as características e desempenho dos veículos, buscou-se avaliar apenas as características do terreno em diferentes condições climáticas, período seco e úmido. Alguns atributos ponderados por esses autores foram desconsiderados nesta análise, por exemplo, áreas suscetíveis a movimentos de massa e áreas com alta densidade de drenagem, visto que estão sendo analisados separadamente neste trabalho, enquanto outros atributos foram adicionados à análise de acordo com os conhecimentos dos autores e disponibilidade dos dados da área de estudo.

Deste modo, foram utilizadas informações referentes à textura dos diferentes níveis do perfil de alteração, nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de

solo, retiradas do mapa de materiais inconsolidados elaborado por Magri (2013), além de informações geológicas e de declividade. Cada plano de informação (produto cartográfico) foi analisado separadamente por meio do processo analítico hierárquico de atribuição de pesos (AHP) para observar a influência de cada plano sobre a trafegabilidade. Posteriormente, as classes de cada produto cartográfico também foram analisadas pela AHP.

Vale ressaltar que no processo analítico hierárquico de atribuição de pesos tanto os planos de informação quanto suas classes foram avaliadas separadamente para as diferentes condições climáticas, úmida e seca, devido à alteração das suas influências sobre a trafegabilidade.

4.2.4.4 Cartas de suscetibilidade a incêndios

A carta de suscetibilidade a incêndios foi elaborada pela sobreposição de planos de informação por meio da soma ponderada dos atributos que condicionam a ignição e/ou propagação dos incêndios. Os atributos considerados, bem como os pesos atribuídos, foram fundamentados nos trabalhos de vários autores: Chuvieco e Congalton (1989); Ferraz e Vettorazzi (1998), Pezzopane, Oliveira Netto e Vilela (2001); Oliveira (2002); Jaiswal et al. (2002); Oliveira et al. (2004); XU et. al (2005); Santos, Louzada e Eugenio (2007); Prudente (2010); Chavan, Das e Suryawanshi (2012) e adaptados as características da área de estudo. Os atributos considerados neste estudo foram os seguintes: declividade, hipsometria, uso e ocupação do solo e variáveis climáticas (precipitação total mensal, evapotranspiração potencial, deficiência hídrica e radiação solar global mensal). As variáveis climáticas são representadas por mapas mensais referentes ao trabalho de Dias (2013a e 2013b).

Dentre as variáveis citadas, é importante esclarecer a forma como a hipsometria e a radiação solar foram analisadas nesse estudo, a influência das demais variáveis na suscetibilidade a ocorrência de incêndio está fundamentada na revisão bibliográfica (item 2.4.2).

Os autores citados consideram a hipsometria como um atributo inversamente proporcional a suscetibilidade a ocorrência de incêndios, visto que em terrenos mais elevados o ar é rarefeito e as temperaturas mais baixas o que diminui tanto a possibilidade de ignição quanto a de propagação dos incêndios (Soares e Batista, 2007 *apud* Prudente, 2010). Apesar dessas considerações, notou-se por observações de campo que os incêndios

na área de estudo ocorrem principalmente nas áreas mais elevadas, provavelmente devido à influência das altas declividades e velocidade dos ventos, que se sobrepõem aos fatores pontuados. Dessa forma, a hipsometria não foi considerada neste trabalho como um atributo inversamente proporcional e sim diretamente.

Em relação à radiação solar, alguns estudos consideram na análise de suscetibilidade à ocorrência de incêndios apenas a orientação da encosta, enquanto outros avaliam a radiação solar pixel a pixel por meio do MDE. Sousa (2009) ressalta que o mapa de radiação solar derivado do MDE se mostra mais adequado a este tipo de estudo por representar as áreas com maior incidência solar, considerando o encobrimento de encostas mais elevadas que podem encobrir outras durante alguns períodos do dia, além de possibilitar o cálculo da radiação de solar em diferentes períodos do ano. Assim, a radiação solar não é considerada neste estudo apenas como uma variável geomorfológica, mas também climática, ou seja, com variações sazonais que permitem melhor identificar os períodos em que a ocorrência de incêndios é mais provável.

4.2.4.5 Suscetibilidade à inundação

Na área de estudo a maioria dos canais de ordens inferiores encontram-se localizados em encostas de morros, e principalmente em serras de amplitudes altimétricas superiores a 300 metros e altas declividades, conferindo ao escoamento superficial alta energia de transporte, enquanto que os canais de ordens superiores que recebem todo o volume escoado das encostas estão localizados em baixos topográficos com declividades muito inferiores ocasionando o represamento do escoamento. Diante dessas diferentes condições geomorfológicas, a suscetibilidade à inundação foi avaliada neste trabalho como inundação de planície e cheia relâmpago.

A suscetibilidade à inundação de planícies foi avaliada em bacias hidrográficas de 2ª ordem de ramificação ou superiores (classificação de Strahler, 1952). O nível de compartimentação geográfica da área de estudo em bacias hidrográficas iguais ou superiores a 2ª deu-se pela adequação à escala desta pesquisa. As bacias de 1ª ordem abrangiam em sua maioria áreas muito pequenas e as de 3ª ordem áreas muito grandes. O método adotado na compartimentação envolveu o agrupamento de bacias de ordens inferiores a que estava sendo compartimentada, assim a área delimitada como bacia de 3ª ordem também abrangeu as áreas delimitadas como de bacias de 2ª ordem e assim sucessivamente para as demais ordens, portanto, toda a área de contribuição a montante

da bacia compartimentada, formada sempre por bacias de menor ordem, foi integrada a sua delimitação.

Essa compartimentação não foi utilizada para a avaliação da suscetibilidade à cheia relâmpago, visto que este tipo de processo foi avaliado apenas nas áreas de contribuição das cachoeiras mapeadas na área de estudo.

Os métodos adotados para obtenção da suscetibilidade desses diferentes processos de inundação são descrito detalhadamente nos tópicos seguintes.

4.2.4.5.1 Suscetibilidade à inundação de planícies

Para elaboração da carta de suscetibilidade à inundação de planícies procurou-se integrar as causas primárias que condicionam o processo de inundação, condições meteorológicas e atmosféricas e as causas secundárias, relacionadas às características das bacias de hidrográficas em termos morfométricos e de uso e ocupação do solo que juntamente com os atributos geomorfológicos e geológicos condicionam a potencialidade do escoamento superficial induzir inundações.

Inicialmente foram levantadas as áreas de baixos topográficos, aquelas cuja amplitude altimétrica vertical em relação ao canal de drenagem mais próximo é muito baixa. Para tanto, utilizou-se o modelo HAND, *Height Above the Nearest Drainage*, que consiste em uma grade de distância vertical referente ao desnível vertical de cada pixel do modelo digital de elevação em relação à drenagem mais próxima (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011).

A rotina utilizada para geração do modelo HAND pode ser executada em linguagem IDL no software ENVI 4.7 ou ainda no software TerraHidro. Devido a maior afinidade do autor com o software ENVI 4.7 optou-se pelo seu uso. As etapas desenvolvidas neste software envolveram as já descritas no item 4.2.3.2 (correção automática do MDE, geração da direção de fluxo, área acumulada e rede de drenagem) e novas etapas, aplicação do algoritmo HAND e fatiamento das classes do modelo. Apesar da rede de drenagem já ter sido extraída do MDEHC no item 4.2.3.2, foi necessário gerar uma nova rede de drenagem com limiar de área acumulada menor que o considerado anteriormente, visto que naquela etapa buscou-se reproduzir todas as drenagens existentes na base topográfica original para verificar a consistência do MDE, enquanto que nesta etapa o objetivo é gerar o modelo HAND para áreas de contribuição maiores ou iguais a bacias de 2ª ordem.

De posse do modelo de direção do fluxo gerado no item 4.2.3.2 e da nova rede de drenagem correspondente na sua maioria a canais de 2ª ordem ou superior executou-se o algoritmo HAND e em seguida aplicou-se o fatiamento da grade utilizando a ferramenta *Density Slice* do software ENVI 4.7 (Figura 30). Os intervalos de distâncias verticais utilizados para o fatiamento do modelo HAND foram definidos com base no estudo geomorfológico desenvolvido por Magri (2013), buscando assim representar ambientais com relevante semelhança hidrológica e geomorfológica.

Figura 30 - Procedimentos para geração e fatiamento do modelo HAND. Fonte: Adaptado de Nobre et al. (2011).

Posteriormente foi calculada a área ocupada pelos baixos topográficos em cada bacia hidrográfica para obtenção do “parâmetro HAND” que foi considerado como um parâmetro morfométrico na elaboração da carta de suscetibilidade morfométrica à inundação. Os demais parâmetros morfométricos foram selecionados conforme a sua relevância no desenvolvimento de inundações indicada na literatura.

Para computar esses parâmetros selecionados foi necessário se obter os parâmetros básicos das fórmulas por meio de mensurações lineares, areais e hipsométricas sobre a rede de drenagem, compartimentação das bacias hidrográficas e modelo digital de elevação no software ArcGIS 10.1. Após a obtenção dos parâmetros básicos, procederam-se os cálculos dos parâmetros morfométricos por meio das fórmulas apresentadas no Quadro 5.

Parâmetros morfométricos	Fórmulas
Densidade de drenagem	$D_d = L_t/A$
Densidade hidrográfica	$D_h = N_1/A$
Relação de bifurcação	$R_b = N_u/(N_{u+1})$
Relação ponderada de bifurcação	$R_{pb} = \Sigma(R_{b_i} \cdot N_i)/\Sigma N_i$
Coeficiente de manutenção	$C_m = (1/D_d) \cdot 1000$
Textura topográfica	$T_t = 10^{0,219649 + 1,115 \log D_d}$
Relação de relevo	$R_r = H_m/C_p$
Índice de rugosidade	$I_r = H_m \cdot D_d$
Sinuosidade	$S = L_{talvegue}/L_{vet}$
Fator de forma	$F = A/L^2$
Em que: A = Área de contribuição L _t = Comprimento total dos canais de drenagem N _u = Número de canais por ordem de ramificação N _{u+1} = Número de canais da ordem superior R _{b_i} = Relação de bifurcação de duas ordem sucessivas N _i = Número de canais envolvido na relação H _m = Amplitude altimétrica máxima da bacia C _p = Maior comprimento da bacia medido paralelamente ao rio principal L _{talvegue} = Comprimento total do rio principal L _{vet} = Comprimento vetorial do rio principal L = Comprimento do maior eixo da bacia	

Quadro 6 - Fórmulas utilizadas para obtenção dos parâmetros morfométricos.

A metodologia adota para agrupar e classificar as bacias hidrográficas em diferentes classes de suscetibilidade, com base em seus parâmetros morfométricos incluindo o parâmetro HAND, seguiu os princípios propostos por Souza (2005) que avaliou a suscetibilidade morfométrica quanto à ocorrência de inundações em bacias hidrográficas da região costeira do Brasil.

A série de valores obtidas para cada parâmetro morfométrico foi dividida em 5 intervalos com diferentes graus de suscetibilidade, 1 para muito baixa a 5 para muito alta. Cada bacia foi então classificada em um determinado nível de suscetibilidade para cada parâmetro. Posteriormente, procedeu-se a integração dos diferentes graus de

suscetibilidade dos parâmetros morfométricos de cada bacia hidrográfica pela soma ponderada dos graus de suscetibilidade aliada aos pesos atributos a cada parâmetro.

Os pesos foram determinados por meio do processo analítico hierárquico de atribuição de pesos (AHP) conforme a importância de cada parâmetro sobre o processo.

Em seguida, a série de valores encontrada pela integração dos diferentes graus de suscetibilidade de cada parâmetro morfométrico foi também dividida em 5 classes para obtenção da carta de suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies com classes variando de 1 (bacias com suscetibilidade muito baixa) a 5 (bacias com suscetibilidade muito alta).

Juntamente à carta de suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies foram integradas a carta de potencial dos meios físico e antrópico ao escoamento superficial e a carta de altura pluviométrica total do trimestre chuvoso, como sugerido por Dias (2013a). Para uso desses planos de informações, foram obtidos seus valores médios por bacia hidrográfica (considerando toda a sua área de montante) por meio da ferramenta *Zonal Statistics as Table* presente na extensão *Spatial Analyst Tools* do software ArcGIS 10.1. Para a série de valores médios de cada plano encontrada para as bacias hidrográficas também foi atribuída diferentes graus de suscetibilidade ao desenvolvimento de inundação de planícies, 1 a 5 (muito baixa a muito alta). Finalmente, essas informações foram combinadas pela soma ponderada dos graus de suscetibilidade aliada aos pesos atributos a cada plano de informação.

4.2.4.5.2 Suscetibilidade à cheia relâmpago

O mapeamento da suscetibilidade à cheia relâmpago foi realizado para as áreas à montante das cachoeiras, adotando-se como unidade geográfica cada área de contribuição. A metodologia envolveu a análise da suscetibilidade morfométrica à cheia relâmpago combinada à suscetibilidade hidrológica.

A classificação da suscetibilidade morfométrica à cheia relâmpago das áreas de contribuição das cachoeiras seguiu os mesmos princípios da elaboração da carta de suscetibilidade morfométrica das bacias hidrográficas à inundação de planícies, enquanto a suscetibilidade hidrológica foi obtida pela combinação dos valores de vazão de cheia e tempo de concentração.

4.2.4.5.2.1 Vazão de cheia

Para o cálculo da vazão de cheia adotou-se o método I-Pai Wu modificado, visto a área de contribuição das cachoeiras analisadas ser inferior a 500 km² e também devido a melhor adequação do método para cálculo de vazão de cheia em áreas rurais comprovado por Genovez (1991). A vazão de cheia de cada cachoeira foi calculada conforme a Equação 3.

$$Q = 0,278 . C . i . A^{0,9} . K$$

Equação 3

Em que:

Q - Vazão de cheia (m³/s)

C - Coeficiente de escoamento superficial

I - intensidade da chuva crítica (mm/h)

A - Área de contribuição (km²)

K - Coeficiente de distribuição espacial da chuva

O valor do expoente 0,9 sobre a área de drenagem faz referência ao efeito do escoamento e a acumulação de água no leito dos cursos d'água (GENOVEZ, 1991).

Coeficiente de escoamento superficial

O coeficiente de escoamento superficial entendido como a relação entre o volume precipitado e o volume escoado, visto que nem toda precipitação que cai sobre a área de contribuição atinge as cachoeiras devido ao preenchimento de depressões e à infiltração (Villela e Mattos, 1975), foi calculado pela Equação 4.

$$C = \frac{2}{(1 + F)} + \frac{c_2}{c_1}$$

Equação 4

F- Índice de circularidade

c_1 - coeficiente de forma

c_2 - coeficiente de escoamento superficial volumétrico

Coeficiente de forma

Em áreas de contribuição muito alongadas o tempo de concentração pode ser superior ao tempo de pico, pois a precipitação que atinge o ponto mais distante da área de contribuição pode não chegar à cachoeira a tempo de contribuir com a vazão de pico (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 1999). Assim o efeito da forma de cada área de contribuição foi considerado por meio da Equação 5.

$$c_1 = \frac{4}{(2 + F)}$$

Equação 5

Coeficiente de escoamento superficial volumétrico

O coeficiente de escoamento superficial volumétrico (Tabela 1), que representa o grau de impermeabilidade do terreno, foi calculado pela ponderação dos coeficientes das diferentes áreas existentes dentro de cada área de contribuição (Equação 6).

$$c_2 = \frac{c_{2_1} \cdot A_1 + c_{2_2} \cdot A_2 + \dots c_{2_n} \cdot A_n}{\Sigma A_i}$$

Equação 6

Em que:

c_{2_n} = coeficiente de escoamento superficial volumétrico das áreas parciais

A_n = áreas parciais

A_i = área total de contribuição das cachoeiras

Tabela 1 - Coeficiente de escoamento superficial volumétrico c_2 do método I-Pai-Wu modificado.

Grau de impermeabilização dos solos	Cobertura do terreno e tipo de solo	c_2
Muito baixo	terreno seco e muito arenoso	0,10
	terreno com vegetação densa	
Baixo	terrenos planos	0,30
	com vegetação rala e/ou esparsa	
	solo arenoso seco	
Médio	terrenos cultivados	0,50
	terrenos com manto fino de material poroso	
	solos com pouca vegetação	
	gramados amplos, prados e campinas	
Alto	declividades médias	0,70
	terrenos pavimentados com declividades médias	
	solos argilosos ou pantanosos	
	terrenos rochosos estéreis ondulados	
Muito alto	vegetação quase inexistente	0,90
	terreno pavimentado com declividades altas	
	terrenos de rocha sã não porosa	
	terreno estéril montanhoso	
	vegetação inexistente	

Fonte: Planidro (-) apud Genovez (1991).

Coeficiente de distribuição espacial da chuva

Como a distribuição espacial das chuvas máximas não apresenta necessariamente um padrão uniforme é necessário que se obtenha os coeficientes de redução (TUCCI, 2009a). Estes coeficientes foram obtidos no ábaco da Figura 31, que relaciona a área de drenagem com o tempo de duração da chuva (adotado igual ao tempo de concentração).

Segundo Tucci (2009b), o tempo de concentração é o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia deslocar-se até seção considerada como foz.

Figura 31 - Coeficiente de distribuição espacial da chuva (U. S. Weather Bureau, 1979 modificado por Prefeitura de São Paulo, 1999).

Intensidade da chuva crítica

A intensidade da chuva crítica é calculada por meio de equações de chuva intensa, no entanto, a área de estudo ou áreas próximas não dispunham destas equações, assim foi necessária a sua obtenção. A metodologia adotada será descrita no próximo item (4.2.4.5.2.2). De maneira geral, as equações de chuva intensa, que relacionam intensidade, duração e frequência das precipitações, possuem a seguinte forma (Equação 7):

$$i = \frac{K.T^a}{(t+b)^c}$$

Equação 7

Em que:

K, a, b, c - parâmetros determinados estatisticamente para cada área.

T - período de retorno

t - duração da chuva. Uehara (1969) e Planidro (-) apud Genovez (1991) recomendam considerar a duração da chuva igual ao tempo de concentração (t_c), que deve ser calculado pela Equação 8.

$$t_c = 57. \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0,385}$$

Equação 8

Em que:

t_c = tempo de concentração (min)

L - comprimento do talvegue principal (km)

S - declividade média da área de contribuição (m/km)

4.2.4.5.2.2 Geração de equações i-d-f

A obtenção de equações que relacionam a intensidade, duração e frequência da precipitação sobre a área de contribuição de cada cachoeira levantada na área de estudo seguiu os princípios metodológicos expostos nos trabalhos de Villela e Mattos (1975); Cardoso, Ullmann e Berto (1998); Vieira, Lombardi Neto e Santos (1998); Oliveira et al. (2000), Carvalho (2007). As principais etapas são discutidas nos tópicos seguintes.

Obtenção das alturas pluviométricas máximas em diferentes períodos de retorno

As alturas pluviométricas máximas das áreas de contribuição das cachoeiras levantadas foram obtidas em mapas de chuva intensa com duração de 1 dia para diferentes períodos de retorno (2, 10, 25, 50 e 100 anos), ou seja, alturas pluviométricas prováveis de ocorrer durante 1 dia com diferentes frequências. Esses mapas foram elaborados por Dias

(2013a) e abrangem a unidade de planejamento de recursos hídricos GD7, que como visto no item 3.3, a área de estudo está totalmente inserida nesta região.

Resumidamente, os mapas de chuva intensa elaborados por Dias (2013a) resultaram da análise das máximas anuais de séries históricas de diversas estações pluviométricas existentes na área da unidade GD7 e adjacências, que passaram por tratamento estatístico, distribuição de Gumbel, para a obtenção das alturas pluviométricas prováveis de ocorrer em cada estação em diferentes períodos de retorno. Posteriormente, os valores obtidos para cada estação foram interpolados no software ArcGIS 10.1 para toda a unidade GD7.

De posse desses mapas em formato digital, foram calculados por meio da ferramenta *Zonal Statistics as Table* presente na extensão *Spatial Analyst Tools* do software ArcGIS 10.1 as alturas pluviométricas máximas médias da área de contribuição de cada cachoeira em diferentes períodos de retorno, o que juntamente com outros procedimentos que ainda serão discutidos permitiu a obtenção da equação i-d-f para a área específica de cada cachoeira e não uma equação geral para toda a área de estudo.

Vale ressaltar que o procedimento adotado para obtenção da altura pluviométrica máxima em vários períodos de retorno é bastante atípico, não sendo necessária tanta precisão, e somente foi realizado porque havia mapas de chuva intensa disponíveis que abrangiam toda a área de estudo. Normalmente, são analisados os dados da estação pluviométrica mais próxima à área para a qual se deseja obter a equação de chuva intensa, aplicado à distribuição de Gumbel às máximas precipitações anuais e obtidas as alturas pluviométricas prováveis em diferentes períodos de retorno para a área total.

Desagregação da chuva de 1 dia

Após a obtenção das alturas pluviométricas máximas médias prováveis de ocorrer durante 1 dia sobre a área de contribuição de cada cachoeira em diferentes períodos de retorno, procedeu-se a desagregação desta chuva diária para chuvas de menor duração, de acordo com as constantes elaboradas por Occhipinti e Santos (1966), conforme a Tabela 2.

Obtiveram-se assim alturas pluviométricas com durações de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 min, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 24 horas com diferentes frequências, ou seja, períodos de retorno. As alturas pluviométricas encontradas foram transformadas em intensidades máximas médias de chuva em mm/h, dividindo a altura pela duração respectiva da chuva.

Deste modo, uma nova planilha foi gerada contendo diferentes intensidades de chuva em mm/h para cada duração e período de retorno.

Tabela 2 - Constantes do modelo de desagregação de chuvas diárias.

Relação	Constante	Multiplicada por	Desagrega para
24h/1d	1,14	^x (dia, Tr)	^x (24 h, Tr)
12h/24h	0,85	^x (24 h, Tr)	^x (12 h, Tr)
10h/24h	0,82	^x (24 h, Tr)	^x (10 h, Tr)
8h/24h	0,78	^x (24 h, Tr)	^x (8 h, Tr)
6h/24h	0,72	^x (24 h, Tr)	^x (6 h, Tr)
4h/24h	0,63	^x (24 h, Tr)	^x (4 h, Tr)
2h/24h	0,52	^x (24 h, Tr)	^x (2 h, Tr)
1h/24h	0,42	^x (24 h, Tr)	^x (1 h, Tr)
30min/1h	0,74	^x (1 h, Tr)	^x (30 min, Tr)
25min/30min	0,91	^x (30 min, Tr)	^x (25 min, Tr)
20min/30min	0,81	^x (30 min, Tr)	^x (20 min, Tr)
15min/30min	0,7	^x (30 min, Tr)	^x (15 min, Tr)
10min/30min	0,54	^x (30 min, Tr)	^x (10 min, Tr)
5min/30min	0,34	^x (30 min, Tr)	^x (5 min, Tr)

Fonte: Occhipinti e Santos (1966).

Definição dos parâmetros K, a, b e c

Com os dados da nova planilha foi possível encontrar os parâmetros K, a, b e c. O parâmetro b foi encontrado por anamorfose e os demais pelo método dos mínimos quadrados.

Vale ressaltar que os procedimentos que serão descritos foram repetidos nos dados de chuvas desagregadas referentes à área de contribuição de cada cachoeira, a fim de obterem-se os parâmetros da equação de cada área específica.

Anamorfose

A técnica de linearização por anamorfose para obtenção do parâmetro b é um processo de sucessivas aproximações de ajuste de curvas i-d-f em uma reta, com base na equação $i_m = K.T^a.(t+b)^{-c}$. Para a geração das curvas foram plotados no eixo y as

intensidades máximas médias da chuva em mm/h em escala logarítmica e no eixo x as suas respectivas durações em minutos também em escala logarítmica, para cada período de retorno. Em seguida, identificou-se no gráfico o trecho de curvas finitas com concavidade voltadas para baixo e o trecho reto, visto que a anamorfose deve ser realizada apenas no trecho curvilíneo. Assim, um novo gráfico foi montado com as intensidades máximas médias da chuva e durações, que representavam o trecho curvilíneo de apenas um período de retorno. O parâmetro b foi obtido por meio de tentativas, de modo que o valor de b adicionado às durações da chuva ($t+b$) permitisse a anamorfose do trecho curvilíneo, ou seja, a sua transformação em uma reta, como pode ser observado na Figura 32 referente ao trabalho de Vieira, Lombard e Santos (1998).

Figura 32 - Transformação das curvas intensidade (i) x duração (t) em retas por anamorfose utilizando $t+20$. Fonte: Vieira, Lombard e Santos (1998).

O valor de b que permitiu o melhor ajuste das curvas foi verificado tanto visualmente quanto pelo melhor valor do coeficiente de correlação (R^2) resultante do ajuste da linha de tendência do tipo potência.

Método dos mínimos quadrados

Após a adição do valor de b às durações da chuva, as curvas de intensidade-duração-frequência em escala logarítmica foram transformadas em retas paralelas, cuja fórmula geral é do tipo da Equação 9.

$$\log_{im} = \log C - c \log (t + b)$$

Equação 9

Em que:

c = parâmetro angular

C = parâmetro linear

Os parâmetros, angular c e linear C, foram determinados a partir dos princípios adotados por Carvalho (2007), que utilizou a equação geral de regressão linear (Equação 10):

$$Y = a'.X + b' + v$$

Equação 10

Em que:

X e Y = variáveis

a' e b' = constantes desconhecidas

v = variável aleatória, de modo que E (v)=0; V (v)= σ^2 para todo X.

Seguindo a regressão linear tem-se: $\log_{im} = Y$, $\log (t+b) = X$, $a' = -c$ e $b' = \log C$. Para determinar a e b, no caso c e C, utilizou-se o critério de menor soma dos quadrados da diferença da variável dependente Y em relação a sua média Y_m pelas equações a seguir (Equações 11 e 12):

$$a = (\Sigma(Y_i(x_i - x_m)))/(\Sigma(x_i - x_m)^2), \text{ onde } x_m = (1/n) \Sigma x_i$$

Equação 11

$$b = Y_m - ax_m, \text{ onde } Y_m = (1/n) \Sigma Y_i$$

Equação 12

Em que:

X_i = valores de X de uma série de dados onde i varia conforme o tamanho da amostra;

x_m = valor médio de X da amostra do tamanho i;

Y_m = a média dos valores de Y;

a = estimativa de a';

b = estimativa de b'.

Com a obtenção do coeficiente linear C para cada período de retorno foi possível calcular os parâmetros a e K restantes, pela equação 13, com a aplicação da regressão linear com ajuste pelos mínimos quadrados, tendo-se $\log C = Y$, $\log T = X$, $a' = a$ e $b' = \log K$ (Equação 13).

$$\log C = \log K + a \log T$$

Equação 13

Após a obtenção dos parâmetros das equações i-d-f para cada área de contribuição das cachoeiras, buscou-se avaliar a alteração da intensidade das precipitações em diferentes períodos de retorno e conseqüentemente, em diferentes probabilidades de ocorrência, visto que segundo Jorge e Uehara (1998) a probabilidade de um determinado evento ocorrer (P) ou ser ultrapassado num ano qualquer é o inverso do período de retorno (Equação 14):

$$P = \frac{1}{T}$$

Equação 14

4.2.4.6 Carta de potencialidades e restrições ao uso turístico

A avaliação final das potencialidades e restrições da área de estudo para uso turístico deu-se pela combinação das seguintes suscetibilidades e restrições da área:

- Carta de suscetibilidade das bacias hidrográficas à ocorrência de inundação de planícies;
- Valores médios obtidos por bacia hidrográfica dos níveis de trafegabilidade;

- Valores médios obtidos por bacia hidrográfica dos níveis de restrição à implantação de vias de acesso;
- Valores médios obtidos por bacia hidrográfica dos níveis de predisposição a movimentos de massa;
- Valores médios obtidos por bacia hidrográfica dos níveis de suscetibilidade à erosão;
- Valores médios obtidos por bacia hidrográfica dos níveis de suscetibilidade a incêndios;

Com exceção da carta de suscetibilidade à inundação de planícies que já foi elaborada por bacias hidrográficas, para as demais foi necessária a obtenção dos valores médios por bacia hidrográfica (considerando toda a sua área de montante), por meio da ferramenta *Zonal Statistics as Table* presente na extensão *Spatial Analyst Tools* do software ArcGIS 10.1. A partir das séries de valores das bacias, extraídos de cada carta, foram definidos intervalos para a classificação das bacias hidrográficas em diferentes níveis de suscetibilidades e restrições. Em seguida, elaborou-se um sistema de chave de codificação das bacias hidrográficas com relação a estes níveis. A partir da chave de codificação de cada bacia, foram adotados critérios para a determinação de diferentes classes de adequabilidade das bacias ao uso turístico. De maneira a tornar mais claro os procedimentos de elaboração deste documento e consequentemente seu entendimento, optou-se por explicar os detalhes de sua elaboração juntamente com a apresentação dos resultados no item 5.9.

4.2.5 Método de atribuição de pesos e combinação de produtos temáticos

Como visto nos itens 4.2.4.3 e 4.2.4.5, para a obtenção de alguns produtos intermediários foram impostos pesos tanto aos atributos (mapas temáticos) quanto às suas classes, para tanto foi adotada a técnica AHP (Processo Analítico Hierárquico), desenvolvida por Saaty (1978). Esta técnica consiste em um processo de escolha baseada na lógica da comparação par a par, que segundo Câmara et al. (2001) permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos.

Para a elaboração de cada produto cartográfico intermediário, os fatores (atributos e as classes dos atributos) foram hierarquizados conforme sua importância sobre o

desenvolvimento do processo analisado e comparados entre si em uma matriz, atribuindo-se um valor de importância relativa (peso) ao relacionamento desses fatores (Tabela 3).

Tabela 3- Escala fundamental de Saaty.

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, para completar a matriz.

Fonte: Saaty (1991).

Após a atribuição de importância, a matriz de comparação pareada foi normalizada, dividindo cada elemento da matriz pela somatória dos elementos da coluna a que o fator pertence. Por fim, foram obtidos os pesos de cada fator calculando a média aritmética de cada linha da matriz a qual ele se refere.

A última etapa do processo consistiu na avaliação da consistência dos pesos obtidos dada pela equação 15, sendo que os pesos dos atributos foram considerados aceitáveis quando RC apresentou valor inferior a 10%.

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Equação 15

Em que:

RC = razão de consistência

IR = Índice de Consistência Random (Tabela 4)

IC = índice de consistência (Equação 16)

Tabela 4 - Índice de Consistência Random.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: (Teknomo, 2006)

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

Equação 16

Em que:

n = ordem da matriz

λ_{max} = autovetor (Equação 17)

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}$$

Equação 17

Em que:

$(Aw)_i$ = matriz resultante do produto da matriz de comparação pareada pela matriz de pesos calculados

W_i = pesos calculados

Após a obtenção dos pesos para os atributos e para as classes dos atributos, foram realizadas operações de sobreposição no software ArcGIS 10.1, por meio da ferramenta *Weighted Sum* presente na extensão *Spatial Analyst*, para obtenção das cartas interpretativas. Os pesos dos atributos foram inseridos na própria ferramenta, enquanto que os pesos das suas classes foram inseridos na tabela de dados de cada atributo pela adição de uma coluna do tipo *double* com o nome “Peso”.

4.2.6 Métodos de classificação dos mapas

A divisão da população dos produtos cartográficos gerados nas várias etapas dessa pesquisa foi realizada por diferentes métodos estatísticos disponíveis no software ArcGIS 10.1. De acordo com Osaragi (2002), durante a classificação de dados espaciais em valores numéricos, para representa-los em forma de mapas, é inevitável a perda de informação dos dados originais, o que pode levar a um mau entendimento sobre a natureza dos dados originais caso não se tenha conhecimento do método de classificação, bem como das características da distribuição dos dados originais.

Buscando resolver este problema adotaram-se as recomendações dos autores citados a seguir e no Quadro 6. De maneira geral, o método de classificação adotado baseou-se na análise do histograma de cada produto cartográfico e escolha do método que melhor se adequava ao tipo de distribuição de dados, conforme indicado por Osaragi (2002).

Para distribuições retangulares, a divisão igual das faixas é apropriada; para distribuições predominantemente unimodal (normal), intervalos relacionados a desvio padrão são mais adequados; e para distribuições J-shaped (skewed), progressões geométricas (EVANS, 1976).

Osaragi (2002), ao investigar as características de diferentes algoritmos de classificação (quantil, igual área, igual intervalo, desvio padrão e quebras naturais) aplicados a diferentes conjuntos de dados concluiu que o método de quebras naturais pode ser aplicado para dados de diferentes naturezas, exceto para dados que não possuem intervalos bem distintos.

Métodos	Funcionamento dos algoritmos	Tipo de distribuição de dados aplicável
Intervalos iguais	As classes são divididas na mesma faixa de valores, isto é, a diferença entre o valor mais alto e mais baixo é igual em cada classe. Este método enfatiza a quantidade de um valor de atributo em relação a outros valores.	É mais bem aplicado para dados uniformemente distribuídos, com intervalos conhecidos, tais como percentagem e temperatura.
Quebras naturais	Valores de dados são agrupados e inseridos dentro de uma classe. A quebra da classe ocorre quando há um intervalo maior entre os agrupamentos.	Dados não uniformemente distribuídos e não direcionados para uma das extremidades da distribuição. Em dados não uniformemente distribuídos muitos atributos tem valores iguais ou similares e há grandes intervalos entre os valores dos grupos.
Quantil	O quantil atribui o mesmo número de valores dos dados para cada classe. É adequado quando se deseja enfatizar a diferença de uma característica em relação às demais. Usando a classificação Quantil, o mapa pode apresentar um resultado errôneo, visto que os atributos são agrupados em números iguais dentro de cada classe. Atributos similares podem ser colocados em classes adjacentes e/ou atributos bem diferentes podem ser colocados na mesma classe. Esse problema pode ser minimizado pelo aumento do número de classes.	Os dados uniformemente distribuídos.
Intervalos geométricos	Classes de valores são baseadas em intervalos que tem uma sequência baseado em um multiplicador. Os intervalos são criados de modo a minimizar a soma quadrática dos elementos por classe, o que permite que cada intervalo tenha um número aproximado de valores, sendo que a mudança entre os intervalos é fracamente consistente. Este método cria um equilíbrio, destacando alterações entre os valores médios e os valores extremos, produzindo assim um resultado que é visualmente aceitável e cartograficamente compreensível.	Os dados uniformemente distribuídos.

Quadro 7 - Tipos de distribuição de dados e melhores métodos de classificação. Fonte: Esri (2014b).
(continua)

Métodos	Funcionamento dos algoritmos	Tipo de distribuição de dados aplicável
Desvio padrão	Mostra quanto o valor de um atributo varia da média dos demais. O ArcMap calcula a média dos valores e então posiciona as classes acima e a abaixo da média em intervalos 1, 0.5 ou 0.25 de desvio padrão até toda a informação estar incluída em uma classe.	O método é mais adequado para ser utilizado com dados que estão de acordo com uma distribuição normal.
Intervalos definidos	Permite especificar uma faixa de intervalo usada para definir uma série de classes com a mesma faixa de valores. Por exemplo, se cada intervalo abrangerá 75 unidades, o ArcMap determinará o número de classes baseado no tamanho do intervalo e na faixa de todos os campos de valores.	-

Quadro 6 - Tipos de distribuição de dados e melhores métodos de classificação. Fonte: Esri (2014b)
(conclusão)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mapa de documentação

No mapa de documentação são apresentados os pontos turísticos identificados em trabalhos existentes e os levantados em campo, bem como pontos de observação para registro fotográfico e coleta de informações que subsidiaram a validação das análises realizadas nesta pesquisa, entre outras informações. O mapa de documentação pode ser observado no Apêndice A.

Considerando os 41 pontos turísticos apresentados no mapa de documentação, 31 são de interesse para o ecoturismo, sendo 8 pousadas e 31 cachoeiras, e 2 são de importância geoturística, apresentando forte relevância arqueológica e geológica. Alguns dos pontos ecoturísticos não apresentam apenas um atrativo, muitos se referem a um conjunto de cachoeiras: Paraíso Perdido, Paraíso Proibido, Paraíso Selvagem e Cachoeiras do Ézio.

5.2 Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente e Carta de Declividade

O modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) sobreposto ao modelo sombreado é apresentado na Figura 33. A área de estudo possui uma variação altimétrica máxima de 704 metros, da cota 746m a 1450m. A distribuição percentual da área ocupada pelas diferentes classes de altitude pode ser observada na Figura 34.

De modo geral, as altitudes superiores a 1000 m predominam na área. As altitudes mais elevadas, superiores a 1300 metros, ocorrem principalmente no compartimento de serras (serra da Matinha, Guarita, Cemitério, Capão, Palmeiras), enquanto que as altitudes menores, inferiores a 1000 metros, incidem no vale da Bateia e regiões colinosas (Canteiros, Babilônia e Guarita).

Figura 33 - Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente.

Figura 34 - Percentual de abrangência das classes hipsométricas na área de estudo.

Na Figura 35 pode ser observada a distribuição percentual das classes de declividade na área de estudo. As menores declividades, inferiores a 6° , ocupam 26% da área e caracterizam-se por relevos planos a suavemente ondulados, onde a velocidade do escoamento superficial varia de lenta a média. As classes de declividade que abrangem a faixa de 6° a 12° ocorrem em 28% da área e são limitantes à implantação de vias de acesso, devido à localização em terrenos colinosos mais inclinados, enquanto que a faixa de 12° a 17° corresponde a 16% da região e caracteriza-se pela forte inclinação do relevo e alta velocidade do escoamento superficial. As classes com inclinação superior a 17° ocorrem em uma percentagem considerável da área de estudo, 30%, apresentando-se em terrenos altamente inclinados, tornando-os bastante sujeitos a movimentos de massa.

Na Figura 36 e no Apêndice B pode ser observada a distribuição espacial das classes de declividade da área de estudo por meio da carta de declividades obtida.

Figura 35 - Percentual de abrangência das classes de declividade na área de estudo.

Figura 36 - Carta de declividade da área de estudo.

As menores declividades encontram-se inseridas em regiões colinosas, vales e platôs, enquanto as maiores são características das encostas de morros e principalmente serras. As declividades superiores a 14° condizem com região de escarpamentos rochosos identificadas em campo.

5.3 Mapas de uso e ocupação do solo

Conforme exposto no item 4.2.3.1, foram elaborados mapas de uso e ocupação do solo para três diferentes períodos, 1964/1967, 1989 e 2009, a fim de realizar-se uma análise temporal do uso e ocupação na área de estudo. As distribuições percentuais e espaciais das classes de uso do solo dos mapas elaborados serão apresentadas, bem como a comparação das percentagens ocupadas por cada classe nos períodos analisados.

O uso e ocupação da área, referente ao ano de 2009, foi classificado principalmente em vegetação do tipo campo (73,03%), mata (11,62%) e alguns poucos fragmentos de campo arbustivo (0,76%). As áreas de uso para a agropecuária consistem em culturas temporárias (3,65%), permanentes (0,01%), silvicultura (0,05) e pastagens (6,55%). Áreas de mineração mapeadas (0,16%), quartzito, são encontradas no sudeste da região, já outros tipos de áreas degradadas, solo exposto, incluindo as áreas de erosão, representam juntas 0,17% (Figura 37). A classe erosão apesar de não se enquadrar como uma forma de uso do solo foi mapeada para avaliar a sua representatividade na área de estudo.

Figura 37 - Distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo (2009) na área de estudo.

A distribuição espacial das classes de uso e ocupação do solo (ano 2009) pode ser observada no mapa apresentado na Figura 38 e no Apêndice C.

As formações florestais que se desenvolvem na área de estudo são do tipo floresta estacional semidecidual montana, conforme Scolforo, Oliveira e Carvalho (2014). O seu desenvolvimento está associado diretamente à disponibilidade de água, espessura e textura dos solos. Desta forma, são mais comuns ao longo de canais de drenagem e vertentes, havendo alguns poucos fragmentos com dimensões maiores em áreas isoladas. Segundo IBAMA (2005), o limite entre as formações florestais e o campo ocorre de forma brusca, não havendo na maioria destas áreas um ambiente de transição (regiões ecótonas).

As culturas são desenvolvidas basicamente na região de relevo plano a suavemente ondulado, principalmente nas regiões da Guarita, Babilônia e Canteiros e as pastagens plantadas no Vale da Bateia e Cândidos, onde o perfil do solo se mostra mais bem estruturado. Nas áreas mapeadas como campo, apesar de não diferenciadas na classificação, podem ser observadas formações de campo limpo, sujo, rupestre e algumas poucas áreas de campo cerrado. As extensas formações de campo rupestre encontram-se inseridas em sua maioria sobre altas declividades e substrato rochoso aflorante ou solo raso, enquanto que as formações de campo limpo estão localizadas em terrenos mais ondulados com declividade média.

A classificação das formações de campo em vegetações naturais não perturbadas se mostra extremamente problemática na área de estudo. Muitas das áreas compostas por estas formações campestres são utilizadas como pastagens naturais para a pecuária leiteira extensiva e semiextensiva, fortemente presente na região. Como estas condições de manejo não puderam ser distinguidas na classificação dos produtos de sensoriamento remoto, buscaram-se informações indiretas que pudessem identificar a dimensão do uso destas áreas na região.

Segundo IBGE (2006), censo agropecuário, 35% da área do município de Delfinópolis e 21% de São João Batista do Glória são destinadas às pastagens. Em Delfinópolis, dos 35%, 20% são de pastagens plantadas e 15% de pastagens naturais, enquanto que em São João Batista do Glória, dos 20%, 9% consistem em pastagens plantadas e 12% em naturais. Uma vez que estes municípios não estão totalmente inseridos na área de estudo, como pode ser observado no item 3 deste trabalho, estas percentagens não podem ser totalmente extrapoladas para a área, mas caso esse padrão se mantenha nos limites destes municípios inseridos na área de estudo, o percentual de área ocupada por pastagens é consideravelmente maior que os 7% mapeados.

Apesar do uso irregular dessas áreas naturais para fins agropecuários, essa condição se mostra menos impactante que a substituição da vegetação nativa por pastagens

plantadas. Entretanto, o uso do fogo como técnica de manejo para a renovação das pastagens naturais ainda é um problema verificado na região.

Figura 38 - Mapa de uso e ocupação do solo. Fonte: Modificado de Dias (2013a)

5.3.1 Análise temporal do uso e ocupação do solo

A Figura 39 apresenta a comparação do uso e ocupação do solo em 2009 (Figura 38) com o uso e ocupação do solo em 1989 (Figura 40). Nota-se que a classe campo foi reduzida em cerca de 5%, porém houve um aumento da classe mata, notando-se assim que provavelmente algumas áreas classificadas como campos em 1989 consistiam em áreas queimadas ou desmatadas que se regeneraram ao longo desses 20 anos. Por outro lado, houve um pequeno aumento na percentagem de pastagem e cultura temporária, possivelmente sobre áreas de campo.

Figura 39 - Comparação da distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo em 1989 e 2009.

Figura 40 - Mapa de uso e ocupação do solo referente ao ano de 1989.

Analisando-se o mapa de uso e ocupação do solo de 1964-1967 (Figura 42) e comparando com o mapeamento de 1989 (Figura 40) e 2009 (Figura 38), por meio do gráfico apresentado na Figura 41, percebe-se que os resultados apresentam o mesmo padrão que a comparação 1989 e 2009. Houve uma diminuição de área da classe campo e um aumento das áreas agrícolas e mata, possivelmente pelos mesmos motivos citados. Em relação à classe mineração, em 1964 esta atividade ainda não havia se iniciado, mas em 1989 já é possível identificar praticamente a mesma área de cavas de quartzito existentes em 2009.

É importante ressaltar que algumas classes foram agrupadas durante a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo de 1964-1967, visto a dificuldade em distinguir certos alvos nas fotografias aéreas utilizadas, devido à escala 1:60.000. Desta forma, as culturas temporária e permanente e pastagens foram agrupadas em uma classe, áreas agropecuárias, e as classes de solo exposto e erosão não puderam ser identificadas.

Figura 41 - Comparação da distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo em 1964/1967, 1989 e 2009.

De modo geral, a área de estudo já se apresentava bastante antropizada em 1964 e o que ocorreu foi apenas uma pequena melhora na preservação das áreas naturais classificadas como mata, possivelmente devido à criação do parque em 1972 e também à aplicação mais rigorosa das leis ambientais nas últimas décadas.

Figura 42 - Mapa de uso e ocupação do solo referente ao período 1964-1967.

5.4 Avaliação das vias de acesso

5.4.1 Levantamento das vias de acesso e análise temporal

Conforme citado no item 4.2.2.1, as vias de acesso foram classificadas de acordo os critérios de nomenclatura do Manual de Abreviaturas, Siglas, Símbolos e Convenções Cartográficas das Forças Armadas - MD33-M-02, Ministério da Defesa (2008). Segundo o referido manual, as vias de acesso devem ser classificadas em Auto-estradas (Classe especial), Rodovias pavimentadas (Classe 1), Rodovias não pavimentadas (Classe 2), Rodovias de tráfego periódico (Classe 3), Caminhos (Classe 4) e Trilhas (Classe 5), porém na área de estudo não foram encontradas vias de acesso que se enquadravam nas classes auto-estradas, rodovias pavimentadas e rodovias não pavimentadas em ambos os períodos analisados (1989 e 2009). Assim, adotaram-se apenas as classes rodovias de tráfego periódico, caminhos e trilhas. As classes caminhos e trilhas ainda foram agrupadas em somente uma classe, denominada caminhos/trilhas, pois a resolução espacial das imagens de satélite do ano de 2009 não permitia mensurar precisamente a largura do leito destes tipos de vias de acesso, considerado o principal critério de classificação.

Em 1989 foram mapeadas 761 km de vias de acessos, das quais 502 km foram classificadas como caminhos/trilhas e 259 km como rodovias de tráfego periódico e em 2009 foram 802 km de vias totais, 509 km de caminhos/trilhas e 293 km de rodovias de tráfego periódico (Tabela 5 e Figuras 43 e 44).

Tabela 5 - Extensão e distribuição percentual das vias de acesso em 1989 e 2009.

Tipos de vias de acesso	1989		2009	
	Extensão (km)	Percentual (%)	Extensão (km)	Percentual (%)
Rodovia de tráfego periódico	259,0	34,0	293,0	36,5
Caminhos/Trilhas	502,5	66,0	509,1	63,5
Total	761,5	100,0	802,1	100,0

Sobre a evolução da implantação de vias de acesso na área de estudo no decorrer desses 20 anos(1989-2009), nota-se um aumento mais significativo sobre a classe rodovias de tráfego periódico, aproximadamente 34 km, enquanto que os caminhos/trilhas praticamente se mantiveram os mesmos. Esse aumento pouco significativo pode ser

entendido de duas diferentes formas: novos caminhos/trilhas realmente não terem sido implantados; ou ainda, a menor resolução espacial das imagens de satélite sobre as ortofotocartas pode ter implicado na digitalização de caminhos/trilhas com leitos mais estreitos somente nas ortofotocartas. A segunda justificativa é possivelmente a mais aceita, visto que relatos de entidades de monitoramento do parque afirmam que o número de caminhos/trilhas tem aumentado muito, principalmente por praticantes de motocross.

Figura 43 - Vias de acesso referentes ao ano de 1989 sobre as ortofotocartas..

Figura 44 - Vias de acesso referentes ao ano de 2009 sobre as imagens de satélite.

5.4.2 Diagnóstico das vias de acesso atuais

O diagnóstico das vias de acesso foi realizado por meio da coleta de informações em campo e avaliação dos atributos geológico-geotécnicos sobre os quais as vias estão sotopostas. Buscou-se relacionar a declividade, materiais inconsolidados, geologia e formas do terreno com os impactos negativos que as vias de acesso estão ocasionando ao meio físico, bem como os possíveis impactos que podem ocorrer.

A classificação que as vias de acesso recebem, rodovias de tráfego periódico ou caminhos/trilhas, é fortemente condicionada pela sua localização na paisagem, devido à limitação ao tráfego de pessoas e veículos que os diferentes tipos de relevo impõem. As rodovias de tráfego periódico estão principalmente localizadas sobre colinas e vales, e os caminhos/trilhas em serras e morros. O padrão das vias de acesso da área de estudo sobre diferentes condições topográficas pode ser observado na Figura 45.

As vias de acesso inseridas em encostas com ampla variação altimétrica quase sempre estão sotopostas a um material inconsolidado bem raso (saprólito) ou diretamente sobre a rocha (quartzito ou xisto). Por outro lado, quando as vias encontram-se localizadas sobre colinas, vales e platôs o perfil de alteração se mostra mais desenvolvido.

Em relação aos impactos ao meio físico, principalmente a erosão, nota-se que as trilhas se mostram como construções bem menos impactantes que as rodovias de tráfego periódico na área de estudo, apesar de apresentarem-se em maior número. Os impactos das trilhas são tomados, em sua maioria, como paisagísticos (Figura 45c), mas isso não se deve aos caminhos/trilhas serem entendidos como construções de baixo impacto e sim devido às favoráveis condições do terreno. Apesar das trilhas estarem localizadas, em maioria, sobre terrenos muito íngremes, o substrato rochoso muitas vezes aflorante se mostra bastante resistente, não propiciando o desenvolvimento de erosões lineares (Figura 45b).

Figura 45 - Padrões de vias de acesso em diferentes condições topográficas. (a) Caminho/trilha em relevo plano; (b) Caminho/trilha sobre relevo acidentado (serra); (c) Vista geral de caminho/trilha sobre relevo acidentado; (d) Rodovia de tráfego periódico sobre platô; (e) Rodovia de tráfego periódico em topografia fortemente inclinada; (f) Rodovia de tráfego periódico em relevo suavemente colinoso.

Embora a maioria dos caminhos/trilhas esteja localizada sobre materiais inconsolidados bastante resistentes, nos poucos locais em que o material é menos resistente o fluxo concentrado desenvolve sulcos que, mesmo não evoluindo para processos erosivos mais intensos, acarretam outros impactos devido à concentração do fluxo do escoamento superficial. Como pode ser notado na Figura 46, o problema é ainda mais intensificado devido à constante alteração do leito da trilha pelos visitantes e fluxo de veículos que originam sulcos, aumentando desta forma a largura do leito e sua capacidade de transporte do escoamento superficial.

Por outro lado, os terrenos menos íngremes com material inconsolidado mais espesso, que concentram a maioria das rodovias de tráfego periódico, são mais predispostos ao desenvolvimento de processos erosivos do que os terrenos em que os caminhos/trilhas estão inseridos. Os processos erosivos desenvolvem-se no próprio leito das rodovias de tráfego periódico ou em suas proximidades devido à falta de sistemas adequados de drenagem.

Figura 46 - Sulco em leito abandonado de caminhos/trilhas ao lado do leito atual.

Considerando toda a área de estudo, observou-se que um dos trechos mais impactados pelas rodovias de tráfego período é a serra Branca, que liga os Cândidos à Babilônia. Na área mostrada na Figura 47 nota-se o desenvolvimento de vários processos erosivos. Esta área apresenta uma predisposição natural à erosão, devido à textura bastante siltosa do material inconsolidado (Figura 47b) com espessura de cerca de um metro. Os processos erosivos deflagrados pela concentração de água no leito da rodovia de tráfego periódico são agravados pelo fluxo de motos e outros veículos *offroad*. Assim como em outras áreas, o processo erosivo inviabilizou o tráfego de veículos na via de acesso e

uma nova via foi implantada paralelamente à antiga, porém esta ainda continua a ser usada para o tráfego de veículos sem que nenhuma medida de recuperação tenha sido aplicada, de modo que o processo erosivo continua a evoluir (Figura 47a).

Figura 47 - Processos erosivos em rodovia de tráfego periódico. (a) Vista geral dos processos erosivos em trecho da serra Branca; (b) Material inconsolidado siltoso bastante espesso constituente da área; (c) Ravina 3 no leito da rodovia de tráfego periódico; (d) Ravina 1 nas proximidades de caminho/trilha, antiga rodovia de tráfego periódico.

5.4.3 Carta de trafegabilidade

As condições de trafegabilidade são fortemente influenciadas pelas condições climáticas. Assim sendo, foram elaboradas duas cartas, uma para o período seco e outra para o período úmido.

Os pesos conferidos aos atributos (planos de informação) e suas respectivas classes, por meio da técnica AHP, para a elaboração da carta de trafegabilidade no período seco e úmido consideram seus comportamentos nestas diferentes condições climáticas. As classes e atributos que apresentavam maior dificuldade de serem trafegadas receberam maiores pesos.

Como visto no item 4.2.4.3, os atributos considerados importantes para a elaboração das cartas de trafegabilidade foram:

- Textura dos diferentes níveis do perfil de alteração: As unidades de materiais inconsolidados, descritas por Magri (2013), apresentam diferentes níveis de alteração em seu perfil vertical. Buscou-se analisar a textura de cada nível, visto que obras de corte e aterro para a implantação de vias de acesso podem atingir níveis mais profundos do perfil de alteração;
- Nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo: Esta análise complementa as informações referentes à textura, já que um dos níveis do perfil pode apresentar textura desfavorável à trafegabilidade, mas não ser o nível predominante. A análise da espessura do solo juntamente a este atributo ocorre devido à existência na área de solos bastante espessos e rasos sobre a rocha sã.
- Informações geológicas e declividade.

A textura dos níveis do perfil de alteração das unidades de materiais inconsolidados, nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo e as unidades geológicas que apresentavam mesmo comportamento frente à trafegabilidade em uma dada condição climática foram agrupadas para facilitar a atribuição de pesos.

O agrupamento das unidades de materiais inconsolidados quanto à textura dos níveis dos perfis de alteração em classes pode ser observada na Tabela 6. A distribuição de pesos nas unidades texturais agrupadas levou em consideração a estabilidade do solo frente ao tráfego de veículos. Em condição seca os solos arenosos não apresentam coesão, dificultando o controle sobre o veículo que desliza facilmente sobre o terreno, principalmente em relevos mais íngremes, ao contrário de solos mais argilosos que possuem coesão. Assim, após a comparação par a par pela matriz AHP (Figura 48) o maior peso, 38%, foi atribuído à classe 1 que apresenta textura mais arenosa e o menor, 4%, à classe 6 mais siltosa.

Tabela 6 - Agrupamento das texturas dos níveis dos perfis de alteração das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período seco).

Classes	Textura
1	areno-argilosa
2	areno-argilosa e arenosa
3	arenosa, areno-siltosa e silte-arenosa
4	variável
5	areno-argilosa, argilo-areno-siltosa e silte-arenosa
6	silte-argilosa, areno-siltosa e silte-arenosa
	argilo-silte-arenosa, areno-siltosa e silto-arenosa
	silte-argilosa
	silte-argilosa e siltosa
	silte-arenosa

Menor trafegabilidade ←							
Menor trafegabilidade ↑	MATRIZ RECÍPROCA						
	Classes de textura	1	2	3	4	5	6
	1	1	2	3	4	5	6
	2	1/2	1	2	3	4	5
	3	1/3	1/2	1	2	3	4
	4	1/4	1/3	1/2	1	2	3
	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
	SOMA	2.45	4.28	7.08	10.83	15.50	21.00
MATRIZ NORMALIZADA							
Classes de textura	1	2	3	4	5	6	Autovetor
1	0.41	0.47	0.42	0.37	0.32	0.29	0.38
2	0.20	0.23	0.28	0.28	0.26	0.24	0.25
3	0.14	0.12	0.14	0.18	0.19	0.19	0.16
4	0.10	0.08	0.07	0.09	0.13	0.14	0.10
5	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.10	0.07
6	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04
ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	6.17	IC	0.03	ICR	1.24	RC	2.72

Figura 48 - Matriz AHP para classes de textura dos níveis dos perfis de alteração (período seco).

Em condições úmidas, as texturas dos níveis dos perfis de alteração se mostravam menos similares quanto ao seu comportamento frente à trafegabilidade, e assim foram divididas em mais classes, conforme a Tabela 7. Inversamente à condição seca, os solos finos (siltes plásticos e argilas) em estado úmido se mostram menos trafegáveis do que os arenosos. As argilas são constituídas principalmente por argilominerais que possuem carga negativa e atraem o polo positivo da água criando fortes ligações representadas pela coesão, que segundo Department of the Army (1994) confere ao solo adesividade e deslizância. A adesividade gera o acúmulo de solo nas rodas do veículo dificultando o deslocamento, enquanto a deslizância ocorre devido à presença de uma camada de solo plástico sobre solo compacto produzindo uma superfície escorregadia. Desta forma, na comparação par a par (Figura 49) o maior peso, 33%, foi atribuído aos solos siltosos e argilosos e o menor, 2%, aos arenosos.

Tabela 7 - Agrupamento das texturas dos níveis dos perfis de alteração das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período úmido).

Classes	Textura
1	silte-argilosa
2	silte-argilosa e siltosa
3	variável
4	silte-arenosa
5	silte-argilosa, areno-siltosa e silte-arenosa argilo-silte-arenosa, areno-siltosa e silto-arenosa
6	areno-argilosa, argilo-areno-siltosa e silte-arenosa
7	arenosa, areno-siltosa e silte-arenosa
8	areno-argilosa areno-argilosa e arenosa

Menor trafegabilidade ←									
Menor trafegabilidade ↑	MATRIZ RECÍPROCA								
	Classes de textura	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	1	2	3	4	5	6	8	9
	2	1/2	1	2	3	4	5	7	8
	3	1/3	1/2	1	2	3	4	6	7
	4	1/4	1/3	1/2	1	2	3	5	6
	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	4	5
	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	4
	7	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/2	1	2
	8	1/8	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/2	1
	SOMA	2.70	4.55	7.39	11.20	15.95	21.75	33.5	42

MATRIZ NORMALIZADA									
Classes de textura	1	2	3	4	5	6	7	8	Autovetor
1	0.37	0.44	0.41	0.36	0.31	0.28	0.24	0.21	0.33
2	0.19	0.22	0.27	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.23
3	0.12	0.11	0.14	0.18	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16
4	0.09	0.07	0.07	0.09	0.13	0.14	0.15	0.14	0.11
5	0.07	0.05	0.05	0.04	0.06	0.09	0.12	0.12	0.08
6	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.10	0.05
7	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.03
8	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	8.51	IC	0.07	ICR	1.41	RC	5.14

Figura 49 - Matriz AHP para classes de textura (período úmido).

A unidade de materiais inconsolidados que apresenta textura variável foi enquadrada, tanto na condição úmida quanto seca, nos piores níveis de trafegabilidade, visto a falta de conhecimento de informações mais específicas. Assim sendo, esta unidade recebeu peso 0,16% em ambas as condições. Segundo Magri (2013), esta unidade corresponde a depósitos aluvionares de área de inundação. A textura destes materiais é bastante variável devido aos processos de deposição fluvial.

Em relação ao agrupamento das unidades de materiais inconsolidados quanto aos níveis/nível predominantes do perfil de alteração/espessura do nível de solo, estas também foram agrupadas conforme a estabilidade do solo frente à trafegabilidade (Tabela 8). Em condição climática seca, as classes cujo substrato rochoso aflora na superfície, com rara ocorrência de um solo pouco espesso, foram definidas como menos trafegáveis e receberam o peso 42%, enquanto que as classes de solo maduro profundo, com peso 6%, foram definidas como mais propícias ao tráfego (Figura 50).

Tabela 8 - Agrupamento em classes dos níveis predominantes do perfil de alteração/ espessura do solo das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período seco).

Classes	Nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo (m)
1	rocha/ 0 - 0,5 rocha/ 0 - 1,3
2	saprólito/ profundo
3	variável/ profundo
4	saprolítico e saprólito/ profundo saprolítico/ profundo
5	maduro e saprólito/ profundo maduro e saprólito/ profundo maduro e saprólito/ profundo maduro/ profundo

Figura 50 - Matriz AHP para nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo (período seco).

Para a comparação pareada das classes no período úmido, estas foram novamente agrupadas de acordo com seu comportamento nessas condições (Tabela 9). Ao contrário da condição seca, as classes com nível do perfil de alteração predominantemente maduro e profundo foram definidas como menos trafegáveis, recebendo peso 36%. Já as que apresentam rocha aflorante, com perfil de solo pouco espesso, foram definidas como mais trafegáveis, peso 3% (Figura 51).

Tabela 9 - Agrupamento em classes dos níveis predominantes do perfil de alteração/ espessura do solo das unidades de materiais inconsolidados quanto à trafegabilidade (período úmido).

Classes	Nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo (m)
1	maduro/ profundo
2	saprólítico/ profundo
3	variável/ profundo
4	maduro e saprólito/ profundo maduro e saprólito/ profundo maduro e saprólito/ profundo
5	saprólítico e saprólito/ profundo
6	saprólito/ profundo
7	rocha/ 0 - 0.5 rocha/ 0 - 1.3

Menor trafegabilidade ←								
Menor trafegabilidade ↑	MATRIZ RECÍPROCA							
	Classes	1	2	3	4	5	6	7
	1	1	2	3	4	5	6	7
	2	1/2	1	2	3	4	5	6
	3	1/3	1/2	1	2	3	4	5
	4	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3
	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
	7	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
SOMA		2.45	4.28	7.08	10.83	15.83	21.50	28
MATRIZ NORMALIZADA								
Classes	1	2	3	4	5	6	7	Autovetor
1	0.41	0.47	0.42	0.37	0.32	0.28	0.25	0.36
2	0.20	0.23	0.28	0.28	0.25	0.23	0.21	0.24
3	0.14	0.12	0.14	0.18	0.19	0.19	0.18	0.16
4	0.10	0.08	0.07	0.09	0.13	0.14	0.14	0.11
5	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.09	0.11	0.07
6	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.07	0.05
7	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03
ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA								
λ máx	7.28	IC	0.05	ICR	1.32	RC	3.52	

Figura 51 - Matriz AHP para nível predominante do perfil de alteração/ espessura do perfil de solo (período úmido).

Diferentemente das análises anteriores, as unidades geológicas foram agrupadas da mesma forma, tanto na condição úmida quanto seca (Tabela 10).

A influência da geologia sobre a trafegabilidade foi atribuída ao grau de metamorfismo das rochas, resistência e diversidade dos minerais constituintes. Em análises de trafegabilidade, a diversidade de minerais formadores da rocha é vista como um fator desfavorável, já que alguns minerais são menos resistentes e se alteram mais rapidamente gerando irregularidades na superfície de tráfego.

Tabela 10 - Agrupamento das unidades geológicas quanto à trafegabilidade (período seco).

Classes	Geologia
1	Coberturas aluvionares.
2	Milonito e localmente gnaisses associados a rochas ultramáficas.
3	Filito com intercalações ocasionais de quartzito.
4	Mica-xisto com intercalações de quartzo-xisto, quartzito, anfibolito e gnaisse.
	Mica-xisto com intercalações comuns de quartzito.
	Mica-xisto com intercalações de quartzo-xisto e quartzito. Ocasionalmente lentes de rochas metabásicas.
	Mica-xisto com ocorrências ocasionais de quartzito e lentes de mármore.
5	Gnaisses com intercalações de xisto quartzo-xisto quartzito e anfibolito.
6	Quartzito com intercalações de mica-xisto.
	Quartzito com intercalações ocasionais de mica-xisto e filito.

Vale lembrar que as coberturas aluvionares foram avaliadas juntamente com as unidades geológicas uma vez que o mapa geológico utilizado neste trabalho não apresentava a litologia existente abaixo destas coberturas. Sendo um tipo de material inconsolidado e não rochoso, as coberturas aluvionares foram enquadradas no pior nível da matriz AHP, tanto na condição seca quanto úmida (Figura 52 e 53). Entretanto, os pesos atribuídos às coberturas aluvionares nestas condições climáticas foram diferentes, devido ao agravamento das condições de trafegabilidade deste material inconsolidado em relação aos outros materiais rochosos no período úmido.

Na condição seca as coberturas aluvionares receberam peso 38% e na condição úmida 47%. Em ambas as condições climáticas, foi atribuída à classe representada pela litologia quartzito o menor peso, 4%.

Trafegabilidade							
Trafegabilidade	MATRIZ RECÍPROCA						
	Classes de geologia	1	2	3	4	5	6
	1	1	2	3	4	5	6
	2	1/2	1	2	3	4	5
	3	1/3	1/2	1	2	3	4
	4	1/4	1/3	1/2	1	2	3
	5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
	6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
SOMA		2.45	4.28	7.08	10.83	15.50	21.00

MATRIZ NORMALIZADA							
Classes de geologia	1	2	3	4	5	6	Autovetor
1	0.41	0.47	0.42	0.37	0.32	0.29	0.38
2	0.20	0.23	0.28	0.28	0.26	0.24	0.25
3	0.14	0.12	0.14	0.18	0.19	0.19	0.16
4	0.10	0.08	0.07	0.09	0.13	0.14	0.10
5	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.10	0.07
6	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	6.17	IC	0.03	ICR	1.24	RC	2.72

Figura 52 - Matriz AHP para unidades geológicas (período seco).

Trafegabilidade							
Trafegabilidade	MATRIZ RECÍPROCA						
	Classes de geologia	1	2	3	4	5	6
	1	1	4	5	6	7	8
	2	1/4	1	3	4	5	6
	3	1/5	1/3	1	2	3	4
	4	1/6	1/4	1/2	1	2	3
	5	1/7	1/5	1/3	1/2	1	2
	6	1/8	1/6	1/4	1/3	1/2	1
SOMA		1.88	5.95	10.08	13.83	18.50	24.00

MATRIZ NORMALIZADA							
Classes de geologia	1	2	3	4	5	6	Autovetor
1	0.53	0.67	0.50	0.43	0.38	0.33	0.47
2	0.13	0.17	0.30	0.29	0.27	0.25	0.23
3	0.11	0.06	0.10	0.14	0.16	0.17	0.12
4	0.09	0.04	0.05	0.07	0.11	0.13	0.08
5	0.08	0.03	0.03	0.04	0.05	0.08	0.05
6	0.07	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	6.47	IC	0.09	ICR	1.24	RC	7.50

Figura 53 - Matriz AHP para unidades geológicas (período úmido).

Os intervalos das classes de declividade foram definidos igualmente, tanto para a condição úmida quanto seca, de acordo com a rampa de inclinação máxima de veículos comuns e traçados e foram hierarquizadas conforme o incremento dos seus valores, como pode ser observado na matriz AHP das Figuras 54 e 55. O intervalo 45-62° recebeu o maior peso, 45% no período seco e 41% no úmido, visto a inviabilidade do tráfego por estes terrenos, exceto motos. Os pesos aferidos aos intervalos 0-2° e 2-5° foram iguais, 4%, pois apresentam níveis de trafegabilidade bem próximos em condição seca, enquanto que na condição úmida os pesos foram 3% e 4%, respectivamente.

Trafegabilidade							
Trafegabilidade	MATRIZ RECÍPROCA						
	Classes	45-62°	25-45°	12-25°	5-12°	2-5°	0-2°
	45-62°	1	3	4	7	8	8
	25-45°	1/3	1	3	6	7	7
	12-25°	1/4	1/3	1	3	4	4
	5-12°	1/7	1/6	1/3	1	2	2
	2-5°	1/8	1/7	1/4	1/2	1	1
	0-2°	1/8	1/7	1/4	1/2	1	1
SOMA		1.98	4.79	8.83	18.00	23.00	23.00
MATRIZ NORMALIZADA							
Classes	45-62°	25-45°	12-25°	5-12°	2-5°	0-2°	Autovetor
45-62°	0.51	0.63	0.45	0.39	0.35	0.35	0.45
25-45°	0.17	0.21	0.34	0.33	0.30	0.30	0.28
12-25°	0.13	0.07	0.11	0.17	0.17	0.17	0.14
5-12°	0.07	0.03	0.04	0.06	0.09	0.09	0.06
2-5°	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
0-2°	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	6.35	IC	0.07	ICR	1.24	RC	5.63

Figura 54 - Matriz AHP para classes de declividade (período seco).

Trafegabilidade							
Trafegabilidade	MATRIZ RECÍPROCA						
	Classes	45-62°	25-45°	12-25°	5-12°	2-5°	0-2°
	45-62°	1	2	3	7	8	9
	25-45°	1/2	1	2	6	7	8
	12-25°	1/3	1/2	1	4	5	6
	5-12°	1/7	1/6	1/4	1	2	3
	2-5°	1/8	1/7	1/5	1/2	1	2
	0-2°	1/9	1/8	1/6	1/3	1/2	1
SOMA		2.21	3.93	6.62	18.83	23.50	29.00

MATRIZ NORMALIZADA							
Classes	45-62°	25-45°	12-25°	5-12°	2-5°	0-2°	Autovetor
45-62°	0.45	0.51	0.45	0.37	0.34	0.31	0.41
25-45°	0.23	0.25	0.30	0.32	0.30	0.28	0.28
12-25°	0.15	0.13	0.15	0.21	0.21	0.21	0.18
5-12°	0.06	0.04	0.04	0.05	0.09	0.10	0.06
2-5°	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.07	0.04
0-2°	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	6.28	IC	0.06	ICR	1.24	RC	4.44

Figura 55 - Matriz AHP para classes de declividade (período úmido).

Após analisar as classes dos atributos separadamente, declividade, nível predominante do perfil de alteração/ espessura do solo, textura dos níveis do perfil de alteração e geologia, estes foram comparados par a par, conforme mostrado nas Figuras 56 e 57. A declividade foi considerada o atributo mais importante no mapeamento de trafegabilidade, recebendo peso 60% na condição seca e 62% na condição úmida. A importância dos demais atributos sobre a trafegabilidade foi considerada de forma diferente, de acordo com a condição climática. No período seco, o nível predominante do perfil de alteração/espessura do solo foi entendido como mais importantes que a textura dos níveis do perfil de alteração e a geologia, as quais foram atribuídas a mesma importância. Por outro lado, no período úmido, foi atribuída maior importância à textura dos níveis do perfil de alteração, seguida do nível predominante do perfil de alteração/espessura do solo e por último, a geologia.

MATRIZ RECÍPROCA					
	Declividade	Espessura e nível predominate (solo)	Textura do solo	Geologia	
Declividade	1	4	5	5	
Espessura e nível predominate (solo)	1/4	1	2	2	
Textura do solo	1/5	1/2	1	1	
Geologia	1/5	1/2	1	1	
SOMA	1.65	6.00	9.00	9.00	

MATRIZ NORMALIZADA					
	Declividade	Espessura e nível predominate (solo)	Textura do solo	Geologia	Autovetor
Declividade	0.61	0.67	0.56	0.56	0.60
Espessura e nível predominate (solo)	0.15	0.17	0.22	0.22	0.19
Textura do solo	0.12	0.08	0.11	0.11	0.11
Geologia	0.12	0.08	0.11	0.11	0.11

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	4.05	IC	0.02	ICR	0.9	RC	1.77

Figura 56 - Matriz AHP para atributos considerados influentes na trafegabilidade (período seco).

Trafegabilidade					
Trafegabilidade	MATRIZ RECÍPROCA				
	Declividade	Textura do solo	Espessura e nível predominate (solo)	Geologia	
	Declividade	1	4	6	7
	Textura do solo	1/4	1	2	3
	Espessura e nível predominate (solo)	1/6	1/2	1	2
	Geologia	1/7	1/3	1/2	1
	SOMA	1.56	5.83	9.50	13.00

MATRIZ NORMALIZADA					
	Declividade	Textura do solo	Espessura e nível predominate (solo)	Geologia	Autovetor
Declividade	0.64	0.69	0.63	0.54	0.62
Textura do solo	0.16	0.17	0.21	0.23	0.19
Espessura e nível predominate (solo)	0.11	0.09	0.11	0.15	0.11
Geologia	0.09	0.06	0.05	0.08	0.07

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	4.08	IC	0.03	ICR	0.9	RC	2.89

Figura 57 - Matriz AHP para atributos considerados influentes na trafegabilidade (período úmido).

Após a definição dos pesos para os atributos e suas classes nas condições úmida e seca, foi realizado o processo de sobreposição e classificação do histograma de frequência em 5 classes de trafegabilidade (muito boa a muito ruim), conforme os procedimentos metodológicos descritos no itens 4.2.5 e 4.2.6.

A carta de trafegabilidade para condição climática úmida pode ser observada na Figura 58 e Apêndice D. Nota-se que maior parte da área de estudo apresenta trafegabilidade média a muito ruim, que é determinada principalmente pela declividade acentuada de terrenos arenosos ou à textura siltosa e argilosa de solos em relevos menos íngremes, como vales e colinas. Assim, devido à influência de um atributo ou outro, muitos terrenos se mostram poucos trafegáveis.

No período seco a área torna-se bem mais trafegável que na condição úmida (Figura 59 e Apêndice D). O atributo mais influente é a declividade, cujas inclinações mais elevadas quase sempre estão associadas à textura arenosa dos solos ou afloramento da rocha, gerando grandes unidades que apresentam atributos com comportamento semelhantes frente à trafegabilidade. Ao contrário do período úmido, as áreas localizadas em relevos planos a ondulados são trafegáveis independente das características dos solos, que nestas condições de relevo apresentam solos profundos com textura pouco variável (siltosa, silte-argilosa ou silte-arenosa).

Figura 58 - Carta de trafegabilidade do período úmido.

Figura 59 - Carta de trafegabilidade do período seco.

A Figura 60 mostra a comparação do percentual das áreas ocupadas pelas diferentes classes de trafegabilidade nos períodos seco e úmido. Como esperado, as classes ruim a muito ruim são mais expressivas na carta de trafegabilidade referente ao período úmido, devido às alterações causadas pela água na resistência e coesão dos solos siltosos e argilosos. Na condição seca, mais da metade da área de estudo, 65%, apresentou trafegabilidade muito boa a média.

Figura 60 - Percentual da área de estudo ocupado pelas classes de trafegabilidade no período úmido e seco.

Buscando verificar a localização das rodovias de tráfego periódico nas cartas de trafegabilidade foi elaborado o gráfico da Figura 61. Aproximadamente, metade das vias estão localizadas em áreas de trafegabilidade muito boa no período seco, e apenas 10% nas classes ruim e muito ruim, enquanto que no período chuvoso, esta percentagem atinge 30%.

É importante ressaltar que a localização das vias de acesso nas cartas de trafegabilidade nem sempre representa a real condição das vias, pois a possibilidade de tráfego é dependente não somente das condições do terreno, mas principalmente dos aspectos contrutivos. Um exemplo é a trecho ilustrado na Figura 62, que mesmo estando inserido em classes que apresentam dificuldades ao tráfego nas cartas de trafegabilidade, em campo, são facilmente transistáveis devido às obras de engenharia realizadas.

Figura 61 - Comparação percentual da extensão das rodovias de tráfego sobre as diferentes classes das cartas de trafegabilidade para o período seco e úmido.

Figura 62 - Trecho de rodovia de tráfego periódico (Serra Calçada) localizada em terreno pouco trafegável.

5.4.4 Análises de densidade

Foram realizadas análises de densidade de vias de acesso, frequência de canais de drenagem e densidade de confluências entre vias e canais. As principais finalidades das análises de densidade de vias e frequência de canais foram subsidiar o entendimento da densidade de confluências e definir áreas restritivas à implantação de vias e áreas com maiores possibilidades de impactos negativos ao meio físico e degradações.

5.4.4.1 Densidade de vias de acesso

A área de estudo apresenta, de modo geral, uma alta densidade de vias de acesso (Figura 63). As classes média a muito alta abrangem 54% da área, ou seja, metade da área de estudo sofre influência direta das vias de acesso que podem deflagrar inúmeros impactos negativos, conforme descrito na revisão bibliográfica, item 2.2.1.

Como pode ser observado na Figura 63, as classes de densidade de caminhos/trilhas baixa a muito alta abrangem uma maior área que estas mesmas classes para a densidade de rodovias de tráfego periódico, devido a maior extensão que ocupam na área de estudo. Ao contrário da densidade de caminhos/trilhas, as rodovias de tráfego periódico quase não apresentam áreas classificadas como muito alta. Para que fosse possível realizar essa comparação, foram adotados os mesmos intervalos de classes utilizados para a avaliação da densidade de vias totais, são eles:

- Densidade de vias de acesso muito baixa: 0,00 - 0,20 km/km²;
- Densidade de vias de acesso baixa: 0,20 - 0,58 km/km²;
- Densidade de vias de acesso média: 0,58 - 1,33 km/km²;
- Densidade de vias de acesso alta: 1,33 - 2,81 km/km²;
- Densidade de vias de acesso muito alta: > 2,81 km/km²;

Figura 63 - Espacialização da densidade de vias totais, caminhos/trilhas e rodovias de tráfego periódico na área de estudo.

5.4.4.2 Frequência de canais de drenagem

Para a análise da frequência de canais de drenagem todos os canais mapeados na área de estudo por Gomes e Collares (2010b) foram considerados, conforme proposto por Horton (1945). Segundo Christofoletti (1980) esta análise tem por finalidade comparar a frequência ou a quantidade de cursos d'água existentes em uma área de tamanho padrão, no caso Km².

A frequência de canais na área de estudo é principalmente controlada por lineamentos estruturais representados por falhas, pela geologia e unidades de terreno que acabam por condicionar a distribuição dos canais nas suas diferentes regiões (Figura 64).

Figura 64 - Frequência de canais de drenagem na área de estudo.

Os diferentes níveis de classificação da frequência de canais apresentados na Figura 64, muito baixa a muito alta, foram determinados conforme o histograma de frequência gerado. Como não foram adotados intervalos específicos da literatura, estes níveis refletem apenas as diferenças entre as regiões da área mapeada.

A frequência varia de alta a muito alta em regiões de milonito e xisto, que sustentam as encostas das serras. Quando estas litologias constituem relevos menos acidentados, como colinas e vales, a frequência de canais varia de muito baixa a média. Nota-se ainda que em morros sustentados por quartzito e xisto/quartzito predomina a frequência alta a muito alta. Na região central da área de estudo, nas proximidades da zona de cisalhamento, os canais de drenagem ocorrem com média frequência condicionados principalmente por falhas.

A frequência de canais mostra-se bastante expressiva, uma vez que 59% da área de estudo pode ser classificada com densidade média a muito alta, enquanto que as classes muito baixa e baixa somam juntas 41% (Tabela 11). Portanto, mais da metade da área apresenta propensão natural a escoar rapidamente a precipitação, sendo ainda mais intensificada pelas vias de acesso que também funcionam como canal de escoamento. Além de concentrar o escoamento, o volume transportado pelas vias de acesso é maior devido a menor taxa de infiltração da superfície compactada das vias. Consequentemente, a velocidade de transporte é mais elevada e o fluxo atinge os canais de drenagem de forma pontual e não difusa, como ocorre em condições naturais, ocasionando impactos mais significativos no aumento da vazão, turbidez e assoreamento dos trechos fluviais.

Tabela 11 - Quantificação percentual da densidade de frequência de canais.

Classe	Percentual de área (%)
Muito baixa	21,2
Baixa	19,9
Média	28,5
Alta	23,0
Muito alta	7,4

O desague pontual do escoamento superficial no canal de drenagem ocorre principalmente pela interceptação das vias em canais, quanto maior o número dessas confluências maiores as alterações no ambiente fluvial.

5.4.4.3 Densidade de confluências

A densidade de confluência foi gerada a partir da identificação dos cruzamentos entre vias de acesso e canais de drenagem, conforme exposto no item 4.2.3.3.1.

A identificação destas confluências, bem como a análise de suas densidades, é considerada bastante importante sobre a magnitude dos impactos ocasionados pelas vias de acesso nos cursos d'água. Regiões que apresentam alta densidade de confluência estão mais sujeitas a degradações, como assoreamento dos canais e aumento da turbidez, visto o grande volume de escoamento superficial e sedimentos transportados pelas vias.

A espacialização das confluências, geradas pela interceptação de vias de acesso e canais de drenagem, na área de estudo pode ser observada na Figura 65. As vias de acesso interceptam um total de 655 canais de drenagem, dos quais 255 são interceptados por rodovias de tráfego periódico e 400 por caminhos/trilhas.

Figura 65 - Espacialização das confluências entre vias de acesso e canais de drenagem.

Como pode ser observado na Figura 66, o maior número de confluências entre vias de acesso e canais de drenagem ocorre em canais de 1ª ordem, em torno de 60%, principalmente devido a pouca limitação que a vazão escoada nestes canais confere ao tráfego, diferentemente dos canais de ordem hierárquica maiores, 4ª, 5ª e 6ª ordens, onde as maiores vazões dificultam o tráfego e tornam necessária a construção de pontes.

Figura 66 - Distribuição percentual do número de confluências por ordens de canais de drenagem.

De acordo com a Figura 67, a área de estudo chega a apresentar quase uma confluência/ km de via de acesso, valor este que vai diminuindo conforme o aumento da ordem de drenagem dos canais.

Figura 67 - Número de confluência por km de via de acesso, total e por ordens de canais de drenagem.

Em relação à densidade de confluências na área de estudo, Figura 68, as classes de densidade muito alta a média ocupam uma percentagem de área considerável, 42,7% (Tabela 12). Porém, a maior parte das áreas com densidade mais elevada ocorre devido ao cruzamento de canais de drenagem com vias de acesso localizadas em regiões de relevo mais planos, assim o escoamento atinge o canal com menos energia disponível para instabilizar seu leito e causar erosão e assoreamento dos trechos fluviais.

Tabela 12 - Percentual de área ocupada por diferentes classes de densidade de confluências.

Classe	Percentual de área (%)
Muito baixa	51,4
Baixa	5,8
Média	13,1
Alta	22,9
Muito alta	6,7

Figura 68 - Densidade de confluências entre canais de drenagem totais e vias de acesso totais

A espacialização da densidade de confluências ainda pode ser observada separadamente por tipo de via de acesso e ordem de canal de drenagem (Figura 69 e 70).

Figura 69- Densidade de confluências entre rodovias de tráfego periódico e canais de drenagem por ordem hierárquica.

Figura 70 - Densidade de confluências entre caminhos/trilhas e canais de drenagem por ordem hierárquica.

Para que fosse possível observar a variação da densidade de confluências nas diferentes combinações dos tipos de vias de acesso com a ordem hierárquica dos canais de drenagem, adotaram-se os intervalos da densidade de confluências entre canais de drenagem totais com vias de acesso totais (Figura 68), são eles:

- Densidade de confluências MUITO BAIXA: 0,00 - 0,04 confluências/km²;
- Densidade de confluências BAIXA: 0,04 - 0,20 confluências/km²;
- Densidade de confluências MÉDIA: 0,20 - 0,83 confluências/km²;
- Densidade de confluências ALTA: 0,83 - 3,23 confluências/km²;
- Densidade de confluências MUITO ALTA: > 3,23 confluências/km²;

Considerando a densidade de confluências na área e a número de confluências/km de via, nota-se que as vias de acesso, principalmente os caminhos/trilhas, estão localizadas de forma inadequada. Para evitar que as vias de acesso sejam hidrologicamente conectadas aos canais fluviais por meio de confluências, estas devem ser construídas prioritariamente nos divisores topográficos, mas quando isto não for possível deve-se buscar interceptar o menor número de canais de drenagem.

5.4.5 Carta de restrição à implantação de vias

Com base nas cartas de frequência de canais de drenagem e densidade de vias de acesso, foram mapeadas áreas restritivas à implantação de vias de acesso (Figura 71). As áreas em que a densidade de vias é muito baixa ou baixa e a frequência de canais varia de média a muito alta, a implantação de novas vias interceptará um grande número de canais de drenagem, gerando conexões entre a via de acesso e o canal de drenagem.

As regiões que apresentam restrição à implantação de vias de acesso ocupam 25% da área de estudo. A maior área restritiva está localizada ao norte sobre xisto/quartzito, apresentando frequência de canais alta e muito alta e poucas vias de acesso, as demais áreas estão distribuídas em fragmentos melhores por quase toda a região.

Figura 71 - Carta de restrição à implantação de vias.

5.4.6 Análises de distância

5.4.6.1 Distância a partir dos canais de drenagem

As faixas de distância foram determinadas a partir dos canais de drenagem, conforme descrito no item 4.2.3.3.2, com o objetivo de determinar o percentual da área de estudo inserida em cada faixa e também a localização das vias de acesso nestas faixas. Quanto maior a proximidade das vias de acesso dos canais de drenagem, mais intensos são os impactos negativos causados aos canais fluviais (erosão, assoreamento, turbidez e outros.)

A Tabela 13 mostra a distribuição percentual da área de estudo nas faixas de proximidades determinadas a partir dos canais de drenagem. As faixas que ocupam as maiores percentagens da área de estudo são as de 30 a 100 metros, 27%, e 100 a 200 metros, 30%.

Tabela 13 - Faixas de proximidades a partir dos canais de drenagem e distribuição percentual destas faixas na área de estudo.

Faixas de proximidade	Percentual ocupado na área (%)
0 - 30 m	14
30 - 100 m	27
100 - 200 m	30
200 - 300 m	16
> 300 m	13

A distribuição das faixas de proximidade a partir dos canais de drenagem é apresentada na Figura 72. A área ocupada por estas faixas de proximidade aumenta à medida que a ordem hierárquica dos canais é menor, devido ao maior número de canais de ordem inferior sobre os de maior ordem. Observa-se na Tabela 13 que as faixas de proximidade menores que 300 metros abrangem, aproximadamente, 90% da área de estudo, assim qualquer interferência antrópica na área de estudo possivelmente ocorrerá sobre a zona de influência direta de algum canal de drenagem.

Figura 72 - Faixas de proximidade a partir dos canais de drenagem por ordem hierárquica.

Em relação à ocorrência de vias de acesso nas diferentes faixas de proximidade, a Figura 73 mostra que o percentual de extensão de vias de acesso é mais significativo nas faixas 30 a 100 metros, 24%, e 100 a 200 metros, 33%. Provavelmente por estas faixas ocuparem maiores áreas, como visto na Tabela 13.

Figura 73 - Extensão percentual das vias de acesso inseridas em faixas de proximidade dos canais de drenagem.

Analisando o percentual de extensão de vias de acesso localizadas nas faixas de proximidades dos canais de drenagem por ordem hierárquica (Figura 74 e Tabela 14), nota-se um maior percentual de vias nas faixas de proximidade dos canais de 1ª ordem e menor no canal de 6ª ordem.

Figura 74 - Extensão percentual das vias de acesso inseridas em faixas de proximidade dos canais de drenagem por ordem hierárquica dos canais.

Ainda de acordo com a Figura 74 e Tabela 14, percebe-se que nas faixas de proximidades dos canais de 2ª a 5ª ordens, principalmente nos de 4ª e 5ª ordens, existe

um maior percentual de extensão de rodovias de tráfego periódico que caminhos/trilhas, pois estes canais estão localizados em uma estreita faixa de relevo mais plano, vales e colinas, sendo seguidos paralelamente por rodovias de tráfego periódico. Por outro lado, próximo aos canais de 1ª e 6ª ordens, há um maior percentual de extensão de caminhos/trilhas que rodovias de tráfego periódico, devido à topografia bastante acidentada nas proximidades destes canais. Ao contrário de muitas regiões, em que canais de ordens superiores ocorrem em relevos mais planos, o relevo nas proximidades do único canal de 6ª ordem da área de estudo é ondulado a fortemente ondulado, caracterizado por serras.

Tabela 14 - Percentagem de extensão dos tipos de vias de acesso localizadas em faixas de proximidades dos canais de drenagem por ordem hierárquica.

Ordem dos canais de drenagem	Trilhas/Caminhos			Rodovias de tráfego periódico	
	Faixas de distância	Percentagem de extensão acumulada	Percentagem de extensão por faixa	Percentagem de extensão acumulada	Percentagem de extensão por faixa
1	30	5,8	5,8	5,5	5,5
	100	23,4	17,6	23,0	17,4
	200	53,9	30,6	51,8	28,9
	300	76,6	22,7	72,8	21,0
	>300	23,4	23,4	27,2	27,2
2	30	1,4	1,4	1,9	1,9
	100	6,3	4,9	7,7	5,8
	200	13,9	7,6	16,8	9,1
	300	23,4	9,4	26,6	9,8
	>300	76,6	76,6	73,4	73,4
3	30	1,27	1,27	1,4	1,4
	100	4,45	3,18	5,7	4,3
	200	8,55	4,09	10,1	4,4
	300	12,86	4,32	15,8	5,7
	>300	87,14	87,14	84,2	84,2
4	30	0,5	0,5	0,5	0,5
	100	2,1	1,6	2,3	1,8
	200	4,1	2,0	5,9	3,5
	300	6,1	2,0	9,1	3,2
	>300	93,9	93,9	90,9	90,9
5	30	0,3	0,3	0,0	0,0
	100	1,3	1,0	0,8	0,7
	200	2,9	1,6	4,1	3,3
	300	4,4	1,5	6,9	2,9
	>300	95,6	95,6	93,1	93,1
6	30	0,2	0,2	0,1	0,1
	100	0,9	0,7	0,4	0,3
	200	1,8	0,9	0,9	0,5
	300	2,2	0,5	1,2	0,3
	>300	97,8	97,8	98,8	98,8

De maneira geral, a proximidade das rodovias de tráfego periódico com canais de 4ª e 5ª ordem de drenagem não é uma situação muito preocupante do ponto de vista do transporte de sedimentos, visto que o relevo plano a suavemente ondulado com perfil de solo bem desenvolvido favorece a infiltração, e apenas uma pequena parcela do escoamento atinge o leito das vias para ser transportado ao canal de drenagem.

Por outro lado, nas proximidades dos canais de ordens inferiores a localização das vias de acesso é mais preocupante quanto ao transporte de sedimentos. A localização em altos gradientes topográficos confere ao escoamento superficial alta velocidade, aumentando o volume devido à baixa infiltração que a condição topográfica confere. Outro aspecto preocupante, devido à concentração de vias próximo aos canais de 1ª e 2ª ordens, faz referência à ocorrência de outras degradações, como por exemplo, a contaminação das nascentes de água.

5.4.6.2 Distância de feições erosivas

Após a avaliação do transporte de sedimentos pela proximidade entre as vias de acesso e os canais de drenagem e pela densidade de confluência, buscou-se averiguar a proximidade de feições erosivas das vias, como forma levantar uma possível influência sobre estas feições.

Para a realização desta análise, foram determinadas faixas de distância a partir das vias de acesso da mesma forma descrita no item 4.2.3.3.2, mas ao invés dos canais de drenagem, adotou-se como pixel de origem a rede de vias de acesso. Em seguida, foram contabilizadas as feições erosivas localizados em cada faixa.

De acordo com a Figura 75, a maioria das feições erosivas está localizada distante dos caminhos/trilhas, ao contrário das rodovias de tráfego periódico, onde mais da metade das feições erosivas ocorrem a menos de 500 metros. Em feições erosivas localizadas a menos de 100 metros é possível afirmar que há uma forte influência da rodovia de tráfego periódico sobre o desenvolvimento e/ou evolução da feição.

Figura 75 - Percentual de feições erosivas localizados nas faixas de distância a partir das vias de acesso.

Pode - se citar como exemplo a influência da rodovia de tráfego periódico sobre a evolução de uma das boçorocas do vale da Bateia (Figura 76). Naturalmente esta área apresenta suscetibilidade à erosão, devido principalmente a uma espessa camada de solo turfoso existente em toda a porção adjacente ao fundo do vale, mas a construção da via de acesso acarretou a aceleração da evolução desta feição erosiva. Como pode ser observado na Figura 76b, a drenagem lateral do escoamento superficial da rodovia de tráfego periódico é totalmente direcionada para a boçoroca, aumentando assim a desagregação e carreamento do solo.

Figura 76 - Erosão em rodovia de tráfego periódico no vale da Bateia. (a) Vista da rodovia de tráfego periódico próximo à boçoroca com localização da calha de drenagem da via; (b) Escoamento superficial da calha de drenagem direcionado para a boçoroca.

5.5 Suscetibilidade à inundação de planícies

5.5.1 Compartimentação da área de estudo

A área de estudo foi compartimentada em 535 bacias hidrográficas de 2ª a 6ª ordens, porém nem todas estão totalmente inseridas na área de estudo, como pode ser observado no Apêndice E. Conforme apresentado no item 3.4, a delimitação da área não é totalmente condizente com os divisores topográficos das regiões hidrográficas, assim as bacias preenchidas em verde, no Anexo E, não estão totalmente inseridas na área de estudo, mas foram mapeadas e integradas à análise hidrológica pela influência à montante que exercem sobre as bacias localizadas na área de estudo próximas a estas. O número total de bacias hidrográficas por ordem hierárquica é apresentado na Tabela 15, sendo que a maior parte das bacias é de 2ª ordem, quase 80% do total, enquanto as que apresentam menor número são as de 5ª e 6ª ordens.

Tabela 15 - Número de bacias hidrográficas por ordem hierárquica.

Ordem hierárquica	Número
2ª ordem	413
3ª ordem	95
4ª ordem	21
5ª ordem	5
6ª ordem	1

As regiões em cinza, localizadas na porção inferior de área de estudo, fazem referência às bacias hidrográficas de 1ª ordem hierárquica que desaguam fora da área de estudo. Como apresentado no item 4.2.4.5, o mapeamento da suscetibilidade à inundação de planícies foi elaborado para bacias a partir de 2ª ordem, assim não se mostrou coerente mapear apenas as bacias de 1ª ordem desta área.

5.5.2 Carta de distância vertical da drenagem mais próxima

A elaboração do modelo HAND, conforme citado por Rodrigues et al. (2011), permite a comparação de terrenos com características hidrológicas e geomorfológicas

similares, mas topograficamente separados. Segundo Vispo e Valeriano (2009) alguns estudos mostram que a topografia exerce grande influência sobre as condições hidrológicas, alterações na disponibilidade de água no solo, distribuição dos grupos de solo e topoclimas.

Desta forma, a diferenciação dos ambientes topográficos na área de estudo deu-se pelo fatiamento do modelo HAND nas seguintes classes:

- Fundos de vale com distância vertical da drenagem mais próxima menor que 5 metros;
- Baixos topográficos circundantes aos fundos de vales com distância vertical da drenagem mais próxima entre 5 metros a 15 metros;
- Vertentes de colinas, morros e serras e topos de colinas com distância vertical da drenagem mais próxima entre 15 metros a 100 metros;
- Vertentes de morros e serras e topos de morros com distância vertical da drenagem mais próxima entre 100 metros a 200 metros;
- Topos de serras com distância vertical da drenagem mais próxima superior a 200 m.

Conforme a Tabela 16 e a Figura 77, 18% da área de estudo consistem em baixos topográficos com distância vertical da drenagem mais próxima inferior a 15 metros, 52% em vertentes de colinas, morros e serras e topos de colinas, 22% em vertentes de morros e serras e topos de morros e 8% em topos de serras com distância superior a 200 metros.

Tabela 16 - Percentual de área ocupado pelas faixas de distância do modelo HAND.

Faixas de distância (m)	Percentual de área (%)
0 - 5	8,2
5 - 15	10,1
15 - 100	52,5
100 - 200	21,6
> 200	7,6

Figura 77 - Carta de distância vertical da drenagem mais próxima da área de estudo.

5.5.3 Carta de suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies

Os parâmetros morfométricos calculados no item 4.2.4.5.1 foram avaliados quanto à sua influência sobre a suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies, conforme recomendado por Souza (2005). Os parâmetros foram então identificados como diretamente ou inversamente proporcionais ao processo (Quadro 7).

Parâmetros diretamente proporcionais		Parâmetros inversamente proporcionais	
Símbolo	Parâmetro morfométrico	Símbolo	Parâmetro morfométrico
A	Área de contribuição	Cm	Coeficiente de manutenção
Kf	Fator de forma		
Dd	Densidade de drenagem		
S	Sinuosidade	Rr	Relação de relevo
Rpb	Relação de bifurcação		
Dh	Densidade hidrográfica		
Tt	Textura topográfica	Ir	Índice de rugosidade
HAND 5	Área de abrangência do HAND<5		

Quadro 8 - Parâmetros morfométricos considerados influentes sobre o desenvolvimento de inundação em planícies.

Os pesos adotados na integração dos parâmetros morfométricos são apresentados na Figura 78. Os parâmetros, área, fator de forma, sinuosidade e HAND<5 obtiveram os maiores valores, 13% cada, e os demais, peso 7%.

MATRIZ RECÍPROCA											
Classes de textura	A	Kf	S	Hand 5	Dd	Dh	Cm	Tt	Ir	Rr	Rpb
A	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Kf	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
S	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Hand 5	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Dd	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1
Dh	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1
Cm	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1
Tt	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1
Ir	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1
Rr	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1
Rpb	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1	1	1	1	1
SOMA	7.50	7.50	7.50	7.50	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00

MATRIZ NORMALIZADA												
Textura	A	Kf	S	Hand 5	Dd	Dh	Cm	Tt	Ir	Rr	Rpb	Autovetor
A	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Kf	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
S	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Hand 5	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Dd	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Dh	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Cm	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Tt	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Ir	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Rr	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Rpb	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	11.00	IC	0.00	ICR	1.56	RC	0.00

Figura 78 - Matriz AHP dos parâmetros morfométricos influentes na suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies.

A partir da combinação dos parâmetros foi gerada a carta de suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies, apresentada na Figura 79. Verificou-se que das 535 bacias hidrográficas, 42 foram classificadas em muito alta e alta, constituindo em sua maioria bacias de maior área e/ou maior ordem hierárquica e localizadas em porções de vales. As demais classificações, média, baixa e muito baixa contabilizam respectivamente 118, 275 e 100 bacias hidrográficas.

Figura 79 - Carta de suscetibilidade morfométrica das bacias hidrográficas à inundação de planícies.

5.5.4 Avaliação final da suscetibilidade à inundação de planícies

O processo de inundação não é o resultado apenas das características morfométricas das bacias hidrográficas, mas também das características físicas e de cobertura do solo que favorecem o escoamento superficial ou a infiltração, além do próprio regime pluviométrico.

Desta forma, para a avaliação da suscetibilidade à inundação de planícies foram integradas à carta de suscetibilidade morfométrica à inundação de planícies as seguintes informações:

- Classificação das bacias hidrográficas quanto ao seu potencial ao escoamento superficial;
- Classificação das bacias hidrográficas quanto à pluviosidade total do trimestre chuvoso;

Estas classificações foram realizadas a partir da carta de potencial dos meios físicos e antrópico ao escoamento superficial e do mapa de pluviosidade total do trimestre chuvoso, elaborados por Dias (2013a). A carta de potencial dos meios físicos e antrópico ao escoamento superficial foi elaborada por meio da soma ponderada de pesos atribuídos a fatores geomorfológicos, geológicos e de uso e ocupação do solo. Esta soma resultou em valores que caracterizam o escoamento superficial qualitativamente, ou seja, quando mais alto o valor do pixel, maior é a velocidade do escoamento superficial e menor é a infiltração na região abrangida.

Como descrito no item 4.2.4.5.1, foram obtidos os valores médios de potencial ao escoamento superficial e pluviosidade por bacia hidrográfica (considerando a sua área de montante). Em seguida, foi realizada a quebra dos intervalos destes valores médios para a classificação em diferentes graus de suscetibilidade ao desenvolvimento de inundação de planícies, 1 a 5 (muito baixa a muito alta), como pode ser observado no Quadro 8. A quebra dos intervalos dos valores médios de potencial ao escoamento superficial das bacias hidrográficas deu-se por meio do procedimento estatístico *Natural Breaks*, enquanto que a quebra dos intervalos dos valores médios de pluviosidade ocorreu por *Geometrical Interval*.

Os procedimentos estatísticos adotados para quebra dos intervalos foram escolhidos de acordo com o tipo de distribuição estatística dos dados, como recomendado por diversos autores citados no item 4.2.6 da revisão bibliográfica.

Parâmetro	Intervalos das classes	Classificação de suscetibilidade
Potencial dos meios físicos e antrópico ao escoamento superficial	36 - 49	Muito alta
	49 - 55	Alta
	55 - 59	Média
	59 - 64	Baixa
	64 - 76	Muito baixa
Pluviosidade total do trimestre chuvoso	737 - 800 mm	Muito baixa
	800 - 830 mm	Baixa
	830 - 844 mm	Média
	844 - 852 mm	Alta
	852 - 867 mm	Muito alta

Quadro 9 - Intervalos das classes de potencial ao escoamento e pluviosidade adotados na classificação da suscetibilidade à inundação de planícies.

Para a combinação dos graus de suscetibilidade da morfometria (carta de suscetibilidade morfométrica) escoamento superficial e pluviosidade, estes atributos foram ponderados conforme a sua importância no desenvolvimento de inundação de planícies (Figura 80). A morfometria foi considerada como o fator mais importante no processo recebendo peso 62%, os demais atributos, escoamento superficial e pluviosidade, receberam pesos 24% e 14%, respectivamente.

MATRIZ RECÍPROCA				
Atributos	Morfometria	Escoamento superficial	Pluviosidade	
Morfometria	1	3	4	
Escoamento superficial	1/3	1	2	
Pluviosidade	1/4	1/2	1	
SOMA	1.58	4.50	7.00	

MATRIZ NORMALIZADA				
Atributos	Morfometria	Escoamento superficial	Pluviosidade	Autovetor
Morfometria	0.63	0.67	0.57	0.62
Escoamento superficial	0.21	0.22	0.29	0.24
Pluviosidade	0.16	0.11	0.14	0.14

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	3.03	IC	0.01	ICR	0.58	RC	2.20

Figura 80 - Matriz AHP dos atributos considerados influentes sobre a suscetibilidade à inundação de planícies.

A integração dos atributos e suas classes permitiu a elaboração da carta de suscetibilidade à inundação de planícies, representadas pelos baixos topográficos definidos no modelo HAND (Figura 81 e Apêndice F). Como pode ser observado na Tabela 17, 32 % dos baixos topográficos apresentam suscetibilidade muito alta ou alta à inundação, 42% muito baixa a baixa e 26% média suscetibilidade à inundação.

Tabela 17 - Percentual de área ocupada pelas classes de suscetibilidade dos baixos topográficos à inundação.

Classes	Percentual de área (%)
Muito baixa	8,25
Baixa	33,89
Média	26,07
Alta	12,61
Muito alta	19,19

Figura 81 - Carta de suscetibilidade à inundação de planícies.

5.6 Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de cheias relâmpago nas cachoeiras

A ocorrência de cheias relâmpago (*flash flooding*), quando as vazões nas drenagens aumentam rapidamente em eventos chuvosos, constitui-se em um fator de risco considerável para usuários e frequentadores das inúmeras cachoeiras e quedas d'água que ocorrem na área estudada.

A avaliação da suscetibilidade às cheias relâmpago foi realizada para 26 áreas de contribuição das cachoeiras mapeadas na área, identificadas como pontos de atração turística. Foram consideradas as características das precipitações que incidem sobre suas áreas de contribuição e suas características morfométricas, geológicas e de uso e ocupação do solo. As cachoeiras localizadas muito próximas e com áreas de contribuição comuns foram agrupadas para facilitar a análise, como é o caso das cachoeiras da pousada Paraíso, que foram agrupadas em Paraíso 1 e 2.

A localização das cachoeiras, bem como a delimitação das suas áreas de contribuição, pode ser observada na Figura 82.

Figura 82 - Espacialização das cachoeiras e suas áreas de contribuição.

5.6.1 Suscetibilidade morfométrica às cheias relâmpago

Conforme explanado nos procedimentos metodológicos, item 4.2.4.5.2, os parâmetros morfométricos do Quadro 5 foram calculados para a área de contribuição das cachoeiras, porém nem todos se mostraram representativos sobre o desenvolvimento de cheias relâmpago, assim foram selecionados apenas os apresentados no Quadro 9.

Segunda - 10h

Parâmetros diretamente proporcionais		Parâmetros inversamente proporcionais	
Símbolo	Parâmetro morfométrico	Símbolo	Parâmetro morfométrico
Kf	Fator de forma	A	Área de contribuição
Dd	Densidade de drenagem	S	Sinuosidade
Dh	Densidade hidrográfica	HAND 5	Área de abrangência do HAND<5
Rr	Relação de relevo	O	Ordem
Vari/alt	Variação altimétrica/área		

Quadro 10 - Parâmetros morfométricos considerados influentes sobre o desenvolvimento de cheias relâmpago.

Para a integração dos diferentes graus de suscetibilidade dos parâmetros morfométricos foram adotados os pesos apresentados na Figura 83. O parâmetro HAND 5 recebeu o maior peso, 35%, visto que mesmo muitos parâmetros sendo favoráveis ao desenvolvimento da cheia relâmpago, uma área de contribuição com HAND<5 muito extensa pode diminuir a onda de propagação.

MATRIZ RECÍPROCA									
Classes de textura	Hand 5	A	Var/alt	O	Kf	Dh	Dd	Rr	S
Hand 5	1	3	3	4	6	6	6	6	6
A	0	1	1	2	3	3	3	3	3
Var/alt	0	1	1	2	3	3	3	3	3
O	0	1	1	1	2	2	2	2	2
Kf	1/6	1/3	1/3	1/2	1	1	1	1	1
Dh	1/6	1/3	1/3	1/2	1	1	1	1	1
Dd	1/6	1/3	1/3	1/2	1	1	1	1	1
Rr	1/6	1/3	1/3	1/2	1	1	1	1	1
S	1/6	1/3	1/3	1/2	1	1	1	1	1
SOMA	2.75	7.17	7.17	11.50	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00

MATRIZ NORMALIZADA										
Textura	Hand 5	A	Var/alt	O	Kf	Dh	Dd	Rr	S	Autovetor
Hand 5	0.36	0.42	0.42	0.35	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.35
A	0.12	0.14	0.14	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15
Var/alt	0.12	0.14	0.14	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15
O	0.09	0.07	0.07	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.09
Kf	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Dh	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Dd	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Rr	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
S	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA							
λ máx	9.06	IC	0.01	ICR	1.45	RC	0.55

Figura 83 - Matriz AHP dos parâmetros morfométricos considerados influentes sobre a suscetibilidade morfométrica à cheias relâmpago.

As cachoeiras que exibiram suscetibilidade morfométrica muito alta são Barulho, Esmeril, Paraíso dos Pássaros, Esmeril, Falcão e Lobo Guará, e muito baixa são as que apresentam grandes áreas de contribuição e grandes extensões de HAND<5, Quilombo, Rasga Saco, Remanso e Bateia (Quadro 10).

Cachoeiras	Suscetibilidade morfométrica	Cachoeiras	Suscetibilidade morfométrica
Barulho	Muito Alta	Paraíso 1	Alta
Bateia	Muito Baixa	Paraíso 2	Média
Capivara do Fumal	Baixa	Paraíso dos Pássaros	Muito Alta
Capivara	Alta	Paraíso Perdido	Média
Carapuça	Média	Paraíso Proibido	Média
Esmeril	Muito Alta	Paraíso Selvagem 1	Alta
Ezio	Alta	Paraíso Selvagem 2	Alta
Falcão	Muito Alta	Quilombo	Muito Baixa
Garrida	Média	Rasga Saco	Muito Baixa
Grinalda	Baixa	Remanso	Muito Baixa
Lobo	Muito Alta	Taboão	Média
Lobo Guará	Muito Alta	Taquara	Baixa
Oratório	Alta	Vitória	Alta

Quadro 11 - Classificação da suscetibilidade morfométrica das áreas de contribuição das cachoeiras.

5.6.2 Equações i-d-f

A elaboração de equações i-d-f exigiu uma grande quantidade de cálculos, que acabam por gerar inúmeras tabelas e gráficos. Assim, os resultados iniciais, que envolveram a desagregação da chuva de 1 dia e demais cálculos realizados para a definição dos parâmetros das equações, serão apresentados apenas para a área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido, no entanto, estes procedimentos foram realizados para todas as demais cachoeiras. Os resultados finais, valores dos parâmetros das equações i-d-f calculados para as áreas de contribuição das cachoeiras, serão devidamente apresentadas no final deste item.

5.6.2.1 Obtenção das alturas pluviométricas máximas em diferentes períodos de retorno

Conforme descrito no item 4.2.4.5.2.2, as alturas pluviométricas máximas médias prováveis de ocorrer sobre as áreas de contribuição das cachoeiras durante 1 dia, em diferentes períodos de retorno, foram obtidas em mapas de chuva intensa, elaborados por Dias (2013a), por meio da ferramenta *Zonal Statistics as Table* do software ArcGIS 10.1, que calcula os valores médios das alturas pluviométricas máximas.

De acordo com a Tabela 18, alturas pluviométricas máximas médias prováveis de ocorrerem em 2, 10, 25, 50 e 100 anos na área de contribuição de cada cachoeira

mostram-se bastante semelhantes, visto a proximidade das áreas analisadas. Observa-se que essas alturas pluviométricas são maiores nas áreas de contribuição localizadas na porção central da área de estudo, por exemplo, Quilombo, Rasca Saco, Remanso, Taboão e menor nas regiões extremas, Paraíso perdido e Ézio.

Tabela 18 - Alturas pluviométricas máximas médias (mm/dia) em diferentes períodos de retorno na área de contribuição das cachoeiras.

Cachoeiras	TR2	TR10	TR25	TR50	TR100
Barulho	82,2	110,8	125,0	135,6	146,2
Bateia	81,5	113,7	129,7	141,7	153,7
Capivara	82,1	111,5	126,2	137,1	148,0
Capivara do Fumal	81,9	110,8	125,2	135,9	146,7
Carapuça	82,5	110,9	125,0	135,5	146,1
Esmeril	81,3	109,0	122,8	133,1	143,4
Ezio	80,7	114,3	131,2	143,7	156,2
Falcão	82,6	112,2	126,9	137,9	148,9
Garrida	82,5	110,9	125,0	135,5	146,1
Grinalda	82,0	111,1	125,6	136,3	147,1
Lobo	80,7	114,2	131,0	143,4	155,8
Lobo Guará	82,7	112,2	126,9	137,9	148,8
Oratório	82,1	111,5	126,2	137,1	148,0
Paraíso 1	81,0	113,8	130,3	142,5	154,7
Paraíso 2	81,0	113,8	130,2	142,4	154,5
Paraíso dos Pássaros	83,5	113,2	128,1	139,1	150,1
Paraíso Perdido	80,0	108,9	123,4	134,1	144,8
Paraíso Proibido	80,3	109,3	123,7	134,4	145,1
Paraíso Selvagem 1	82,0	112,6	127,9	139,3	150,7
Paraíso Selvagem 2	82,0	112,1	127,2	138,4	149,6
Quilombo	83,6	114,5	129,9	141,4	152,8
Rasca Saco	83,6	114,3	129,5	140,9	152,3
Remanso	83,6	114,4	129,7	141,2	152,6
Taboão	82,4	115,5	132,1	144,4	156,7
Taquara	82,0	111,1	125,6	136,4	147,1
Vitória	81,2	109,3	123,2	133,7	144,1

Fonte: (Extraído dos mapas de chuva intensa elaborados por Dias, 2013a).

5.6.2.2 Desagregação da chuva de 1 dia

Os resultados da desagregação das alturas pluviométricas máximas médias da chuva diária para durações menores na área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido é apresentado na Tabela 19. Estes valores são entendidos como a provável altura pluviométrica precipitada em diferentes durações de chuva com determinadas frequências de recorrência, por exemplo, é provável que uma chuva com duração de 10 horas precipite no total 74,8 mm em um período de recorrência de 2 anos, assim o total precipitado em um dia será 74,8 mm.

Tabela 19 - Alturas pluviométricas máximas médias (mm/dia) para durações e períodos de retorno selecionados obtidas por meio da desagregação da chuva de 1 dia na área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido.

Duração	TR2	TR10	TR25	TR50	TR100
1d	80,0	108,9	123,4	134,1	144,8
24h	91,2	124,2	140,6	152,9	165,1
12h	77,6	105,6	119,5	130,0	140,3
10h	74,8	101,8	115,3	125,4	135,4
8h	71,2	96,9	109,7	119,2	128,8
6h	65,7	89,4	101,3	110,1	118,9
4h	57,5	78,2	88,6	96,3	104,0
2h	47,4	64,6	73,1	79,5	85,8
1h	38,3	52,2	59,1	64,2	69,3
30min	28,4	38,6	43,7	47,5	51,3
25min	25,8	35,1	39,8	43,2	46,7
20 min	23,0	31,3	35,4	38,5	41,6
15 min	19,9	27,0	30,6	33,3	35,9
10min	15,3	20,8	23,6	25,7	27,7
5min	9,6	13,1	14,9	16,2	17,4

Os resultados da Tabela 19 foram utilizados para a obtenção da intensidade da precipitação (mm/h), que é efetivamente importante na construção de curvas i-d-f (Tabela 20). Nota-se que a intensidade da precipitação aumenta à medida que a sua duração diminui e o período de retorno aumenta.

Tabela 20 - Intensidades máximas médias (mm/h) para durações e períodos de retorno selecionados obtidas por meio da desagregação da chuva de 1 dia na área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido.

Duração	TR2	TR10	TR25	TR50	TR100
24h	3,8	5,2	5,9	6,4	6,9
12h	6,5	8,8	10,0	10,8	11,7
10h	7,5	10,2	11,5	12,5	13,5
8h	8,9	12,1	13,7	14,9	16,1
6h	10,9	14,9	16,9	18,3	19,8
4h	14,4	19,6	22,2	24,1	26,0
2h	23,7	32,3	36,6	39,7	42,9
1h	38,3	52,2	59,1	64,2	69,3
30min	56,7	77,2	87,4	95,0	102,6
25min	61,9	84,3	95,5	103,8	112,1
20 min	68,9	93,8	106,2	115,5	124,7
15 min	79,4	108,1	122,4	133,0	143,7
10min	91,9	125,1	141,6	154,0	166,2
5min	115,7	157,5	178,3	193,9	209,3

De posse da intensidade das precipitações com diferentes durações e frequências de recorrência, foram construídas as curvas i-d-f da área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido (Figura 84), que possibilitaram a determinação dos parâmetros da equação.

Figura 84 - Curvas de intensidade-duração-frequência da área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido.

5.6.2.3 Parâmetros da equação i-d-f

5.6.2.3.1 Parâmetro b

O trecho curvilíneo das curvas i-d-f (Figura 84) foi identificado como sendo de 5 min a 240 min. Por meio de análise visual e auxílio de uma régua identificou-se que o valor do parâmetro b encontrava-se entre 9 e 12, ou seja, um dos valores desta faixa adicionado às durações inferiores a 240 min resultaria em uma reta, anamorfose.

Foram selecionados os valores de intensidade (mm/h) e duração (min) do trecho curvilíneo referente apenas ao período de retorno de 2 anos para a elaboração de uma nova tabela, adicionando-se os valores existente entre 9 e 12 à duração, para a construção das possíveis retas por anamorfose (Tabela 21 e Figura 85).

O valor de b adicionado à duração da precipitação que resultou no melhor coeficiente de correlação (R^2) foi 11, conforme Figura 85d. Uma vez obtido o parâmetro b, este foi adicionado às durações inferiores a 240 min de todos os períodos de retorno para a construção do gráfico da Figura 86.

Tabela 21 - Possíveis valores do parâmetro b adicionados à duração (t) para anamorfose do trecho curvilíneo da curva referente ao período de retorno 2 anos.

t (min)	i (mm/h)	t + 10	t + 13	t + 9	t + 11	t + 12
240	14,4	250	253	249	251	252
120	23,7	130	133	129	131	132
60	38,3	70	73	69	71	72
30	56,7	40	43	39	41	42
25	61,9	35	38	34	36	37
20	68,9	30	33	29	31	32
15	79,4	25	28	24	26	27
10	91,9	20	23	19	21	22
5	115,7	15	18	14	16	17

Figura 85 - Tentativa de anamorfose do trecho curvilíneo da curva intensidade x duração para o período de retorno igual a 2 anos. (a) $t + 10$; (b) $t + 13$; (c) $t + 9$; (d) $t + 11$; (e) $t + 12$.

Figura 86 - Transformação das curvas intensidade (i) - duração (t) - frequência (TR) em retas por anamorfose utilizando $t+11$.

5.6.2.3.2 Parâmetros a, c e K

Para a definição dos parâmetros a e K foram inicialmente determinados os coeficientes angulares, parâmetro c, e os coeficientes lineares (C) das retas linearizadas de cada período de retorno (Tabela 22 a 26). Percebe-se que em cada período de retorno um coeficiente linear diferente é encontrado, enquanto que o coeficiente angular é sempre igual, pois a inclinação das retas i-d-f em relação ao eixo das abscissas (x) é muito semelhante ao contrário dos coeficientes lineares que representam o valor numérico por onde a reta intercepta o eixo das ordenadas (y). O valor do coeficiente angular ainda pode ser confirmado na equação do gráfico da Figura 86.

Tabela 22 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 2 anos.

t (min)	i (mm/h)	Yi=(LOGi)	Yi.(xi - xm)	(t+b) (min)	xi=log (t+b)	xi - xm	(xi - xm) ²	
1440	3,802	0,5800	0,6306	1451	3,1617	1,0872	1,1821	
720	6,463	0,8104	0,6398	731	2,8639	0,7895	0,6233	
600	7,482	0,8740	0,6220	611	2,7860	0,7116	0,5064	
480	8,896	0,9492	0,5853	491	2,6911	0,6166	0,3803	
360	10,949	1,0394	0,5144	371	2,5694	0,4949	0,2450	
240	14,371	1,1575	0,3765	251	2,3997	0,3252	0,1058	
120	23,724	1,3752	0,0589	131	2,1173	0,0428	0,0018	
60	38,323	1,5835	-0,3534	71	1,8513	-0,2232	0,0498	
30	56,718	1,7537	-0,8096	41	1,6128	-0,4616	0,2131	
25	61,936	1,7919	-0,9285	36	1,5563	-0,5181	0,2685	
20	68,912	1,8383	-1,0719	31	1,4914	-0,5831	0,3400	
15	79,405	1,8998	-1,2529	26	1,4150	-0,6595	0,4349	
10	91,883	1,9632	-1,4768	21	1,3222	-0,7522	0,5658	
5	115,704	2,0633	-1,7958	16	1,2041	-0,8703	0,7574	
Ym=		1,4057	-4,2612	Xm=		2,0744	0,0000	5,6741
		a=	-0,7510			b=	2,9635	
		c=	0,7510			C=	919,4946	

Tabela 23 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 10 anos.

t (min)	i (mm/h)	Yi=(LOGi)	Yi.(xi - xm)	(t+b) (min)	xi=log (t+b)	xi - xm	(xi - xm) ²	
1440	5,174	0,7139	0,7761	1451	3,1617	1,0872	1,1821	
720	8,797	0,9443	0,7455	731	2,8639	0,7895	0,6233	
600	10,183	1,0079	0,7172	611	2,7860	0,7116	0,5064	
480	12,108	1,0831	0,6679	491	2,6911	0,6166	0,3803	
360	14,902	1,1733	0,5807	371	2,5694	0,4949	0,2450	
240	19,560	1,2914	0,4200	251	2,3997	0,3252	0,1058	
120	32,289	1,5091	0,0646	131	2,1173	0,0428	0,0018	
60	52,159	1,7173	-0,3833	71	1,8513	-0,2232	0,0498	
30	77,195	1,8876	-0,8714	41	1,6128	-0,4616	0,2131	
25	84,297	1,9258	-0,9978	36	1,5563	-0,5181	0,2685	
20	93,792	1,9722	-1,1499	31	1,4914	-0,5831	0,3400	
15	108,073	2,0337	-1,3412	26	1,4150	-0,6595	0,4349	
10	125,056	2,0971	-1,5775	21	1,3222	-0,7522	0,5658	
5	157,478	2,1972	-1,9123	16	1,2041	-0,8703	0,7574	
Ym=		1,5396	-4,2612	Xm=		2,0744	0,0000	5,6741
		a=	-0,7510			b=	3,0974	
		c=	0,7510			C=	1251,4638	

Tabela 24 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 25 anos.

t (min)	i (mm/h)	Yi=(LOGi)	Yi.(xi - xm)	(t+b) (min)	xi=log (t+b)	xi - xm	(xi - xm) ²
1440	5,860	0,7679	0,8349	1451	3,1617	1,0872	1,1821
720	9,962	0,9983	0,7882	731	2,8639	0,7895	0,6233
600	11,532	1,0619	0,7557	611	2,7860	0,7116	0,5064
480	13,712	1,1371	0,7012	491	2,6911	0,6166	0,3803
360	16,876	1,2273	0,6074	371	2,5694	0,4949	0,2450
240	22,150	1,3454	0,4376	251	2,3997	0,3252	0,1058
120	36,565	1,5631	0,0670	131	2,1173	0,0428	0,0018
60	59,067	1,7713	-0,3953	71	1,8513	-0,2232	0,0498
30	87,419	1,9416	-0,8963	41	1,6128	-0,4616	0,2131
25	95,462	1,9798	-1,0258	36	1,5563	-0,5181	0,2685
20	106,214	2,0262	-1,1814	31	1,4914	-0,5831	0,3400
15	122,387	2,0877	-1,3768	26	1,4150	-0,6595	0,4349
10	141,619	2,1511	-1,6181	21	1,3222	-0,7522	0,5658
5	178,335	2,2512	-1,9593	16	1,2041	-0,8703	0,7574
Ym= 1,5936		-4,2612		Xm= 2,0744		0,0000	
		a= -0,7510				b= 3,1514	
		c= 0,7510				C= 1417,2155	

Tabela 25 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 50 anos.

t (min)	i (mm/h)	Yi=(LOGi)	Yi.(xi - xm)	(t+b) (min)	xi=log (t+b)	xi - xm	(xi - xm) ²
1440	6,370	0,8042	0,8743	1451	3,1617	1,0872	1,1821
720	10,829	1,0346	0,8168	731	2,8639	0,7895	0,6233
600	12,537	1,0982	0,7815	611	2,7860	0,7116	0,5064
480	14,906	1,1734	0,7236	491	2,6911	0,6166	0,3803
360	18,346	1,2635	0,6254	371	2,5694	0,4949	0,2450
240	24,079	1,3816	0,4494	251	2,3997	0,3252	0,1058
120	39,750	1,5993	0,0685	131	2,1173	0,0428	0,0018
60	64,212	1,8076	-0,4034	71	1,8513	-0,2232	0,0498
30	95,033	1,9779	-0,9131	41	1,6128	-0,4616	0,2131
25	103,776	2,0161	-1,0446	36	1,5563	-0,5181	0,2685
20	115,465	2,0625	-1,2026	31	1,4914	-0,5831	0,3400
15	133,046	2,1240	-1,4007	26	1,4150	-0,6595	0,4349
10	153,954	2,1874	-1,6454	21	1,3222	-0,7522	0,5658
5	193,867	2,2875	-1,9908	16	1,2041	-0,8703	0,7574
Ym= 1,6298		-4,2612		Xm= 2,0744		0,0000	
		a= -0,7510				b= 3,1877	
		c= 0,7510				C= 1540,6521	

Tabela 26 - Parâmetros c e C calculados para o TR = 100 anos.

t (min)	i (mm/h)	Yi=(LOGi)	Yi. (xi - xm)	(t+b) (min)	xi = log	xi - xm	(xi - xm) ²
1440	6,878	0,8375	0,9105	1451	3,1617	1,0872	1,1821
720	11,693	1,0679	0,8431	731	2,8639	0,7895	0,6233
600	13,536	1,1315	0,8052	611	2,7860	0,7116	0,5064
480	16,095	1,2067	0,7441	491	2,6911	0,6166	0,3803
360	19,809	1,2969	0,6419	371	2,5694	0,4949	0,2450
240	26,000	1,4150	0,4602	251	2,3997	0,3252	0,1058
120	42,920	1,6327	0,0699	131	2,1173	0,0428	0,0018
60	69,333	1,8409	-0,4108	71	1,8513	-0,2232	0,0498
30	102,613	2,0112	-0,9285	41	1,6128	-0,4616	0,2131
25	112,053	2,0494	-1,0619	36	1,5563	-0,5181	0,2685
20	124,674	2,0958	-1,2220	31	1,4914	-0,5831	0,3400
15	143,658	2,1573	-1,4227	26	1,4150	-0,6595	0,4349
10	166,232	2,2207	-1,6705	21	1,3222	-0,7522	0,5658
5	209,330	2,3208	-2,0198	16	1,2041	-0,8703	0,7574
Ym= 1,6632		-4,2612	Xm= 2,0744		0,0000	5,6741	
a= -0,7510		b= 3,2210		c= 0,7510		C= 1663,5304	

Com a obtenção dos coeficientes lineares C das retas linearizadas de cada período de retorno, os parâmetros a e K foram calculados (Tabela 27).

Tabela 27 - Parâmetros a e k calculados a partir dos coeficientes lineares das retas linearizadas para Tr 2, 10, 25, 50 e 100 anos.

Tr	C	Yi=b=log C	Yi.(xi - xm)	Xi=log Tr	Xi=log Tr	(Xi - Xm)	(Xi - Xm) ²
2	919,4946	2,9635	-2,9000	0,3010	0,3010	-0,9786	0,9576
10	1251,4638	3,0974	-0,8660	1,0000	1,0000	-0,2796	0,0782
25	1417,2155	3,1514	0,3730	1,3979	1,3979	0,1184	0,0140
50	1540,6521	3,1877	1,3369	1,6990	1,6990	0,4194	0,1759
100	1663,5304	3,2210	2,3205	2,0000	2,0000	0,7204	0,5190
Ym= 3,1242		0,2643	Xm= 1,2796		0,0000	1,7446	
a= 0,1515		b= 2,9304		a= 0,1515		K= 851,8680	

Assim todos os parâmetros foram obtidos para a formulação da equação i-d-f da área de contribuição da cachoeira Paraíso Perdido (Equação 18). Os parâmetros das equações referentes às demais áreas de contribuição são apresentadas na Tabela 28.

$$i_m = \frac{851,87 \cdot T^{0,152}}{(t + 11)^{0,751}}$$

Equação 18

Pode-se observar que os parâmetros b e c apresentaram o mesmo valor em todas as áreas de contribuição, possivelmente devido à proximidade das áreas.

Tabela 28 - Parâmetros das equações i-d-f calculados para as áreas de contribuição das cachoeiras.

Cachoeira	k	a	b	c
Barulho	876,011	0,147	11	0,751
Bateia	863,388	0,162	11	0,751
Capivara do Fumal	872,172	0,149	11	0,751
Capivara	874,664	0,150	11	0,751
Carapuça	880,053	0,146	11	0,751
Esmeril	866,905	0,145	11	0,751
Ezio	853,072	0,169	11	0,751
Falcão	879,474	0,150	11	0,751
Garrida	880,088	0,146	11	0,751
Grinalda	873,725	0,149	11	0,751
Lobo	854,115	0,168	11	0,751
Lobo Guará	880,376	0,150	11	0,751
Oratório	874,737	0,150	11	0,751
Paraíso 1	857,554	0,165	11	0,751
Paraíso 2	857,959	0,165	11	0,751
Paraíso dos	889,173	0,150	11	0,751
Paraíso Proibido	855,206	0,151	11	0,751
Paraíso Selvagem 1	871,642	0,155	11	0,751
Paraíso Selvagem 2	872,229	0,153	11	0,751
Quilombo	889,357	0,154	11	0,751
Rasga Saco	888,929	0,153	11	0,751
Remanso	889,195	0,154	11	0,751
Taboão	872,862	0,164	11	0,751
Taquara	873,748	0,149	11	0,751
Vitória	866,164	0,146	11	0,751

Quanto à probabilidade de ocorrência de chuvas com diferentes intensidades e frequências (1 a 10 anos e 10 a 100 anos), Figura 87, nota-se que nas menores áreas de contribuição a intensidade da chuva é maior, como Esmeril e Paraíso dos Pássaros, uma vez

que em bacias menores a possibilidade da chuva intensa atingir toda a extensão é maior, ao contrário de bacias maiores como, por exemplo, Rasga Saco, Quilombo e Remanso. Além disso, há um aumento pouco significativo da intensidade da chuva até um período de retorno de cerca de 5 anos, em que a probabilidade de ocorrência é 20%, a partir de então, a intensidade da chuva aumenta consideravelmente a medida que o período de retorno é maior e probabilidade de ocorrência menor.

Figura 87 - Intensidade da chuva em diferentes períodos de retorno (probabilidades de ocorrência) para a área de contribuição das cachoeiras.

5.6.3 Suscetibilidade hidrológica

Conforme pode ser observado na Tabela 29, os menores tempos de concentração são esperados em bacias de contribuição que apresentam maior declividade média e canal principal pouco extenso, que na área de estudo coincidem com as cachoeiras que possuem menores áreas de contribuição, Ézio, Paraíso dos Pássaros, Barulho, Lobo Guará.

Tabela 29 - Tempo de concentração das áreas de contribuição das cachoeiras.

Cachoeiras	Tc (min)	Cachoeiras	Tc (min)
Barulho	11,61	Paraíso 1	38,51
Bateia	112,48	Paraíso 2	48,43
Capirava do Fumal	81,82	Paraíso dos Pássaros	7,53
Capivara	35,87	Paraíso Perdido	54,55
Carapuça	42,52	Paraíso Proibido	40,38
Esmeril	5,70	Paraíso Selvagem 1	25,53
Ezio	26,40	Paraíso Selvagem 2	19,95
Falcão	20,40	Quilombo	164,78
Garrida	42,00	Rasga Saco	193,96
Grinalda	61,94	Remanso	177,33
Lobo	21,23	Taboão	35,66
Lobo Guará	10,24	Taquara	60,48
Oratório	39,73	Vitória	25,86

Quanto à vazão de cheia das cachoeiras, a Tabela 30 e Figura 88 apresentam os valores esperados em 5, 10 e 50 anos. A tabela completa com todos os parâmetros utilizados nos cálculos pode ser observada no Apêndice G.

Tabela 30 - Vazão de cheia calculada para as cachoeiras em um período de retorno de 5, 10 e 50 anos.

Cachoeiras	Vazão de cheia (m³/s)			Cachoeiras	Vazão de cheia (m³/s)		
	5 anos	10 anos	50 anos		5 anos	10 anos	50 anos
Barulho	11,11	12,30	15,59	Paraíso 1	28,31	31,75	41,43
Bateia	53,74	60,13	78,07	Paraíso 2	37,96	42,56	55,50
Capivara do Fumal	65,07	72,14	91,69	Paraíso dos Pássaros	5,09	5,64	7,18
Capivara	21,75	24,14	30,75	Paraíso Perdido	44,52	49,45	63,11
Carapuça	21,20	23,45	29,66	Paraíso Proibido	39,79	44,19	56,35
Esmeril	2,42	2,68	3,38	Paraíso Selvagem 1	17,52	19,51	25,06
Ezio	13,35	15,01	19,69	Paraíso Selvagem 2	17,72	19,71	25,23
Falcão	17,64	19,58	24,94	Quilombo	104,56	116,34	149,05
Garrida	20,40	22,57	28,54	Rasga Saco	118,92	132,26	169,28
Grinalda	49,58	54,98	69,91	Remanso	118,38	131,69	168,64
Lobo	13,64	15,33	20,09	Taboão	40,77	45,68	59,50
Lobo Guará	6,90	7,66	9,75	Taquara	49,63	55,04	69,99
Oratório	21,84	24,24	30,88	Vitória	13,48	14,91	18,88

De acordo com a Tabela 30 e Figura 88, as maiores vazões são esperadas em cachoeiras que apresentam maiores áreas de contribuição, entretanto a área não é fator

totalmente proporcional à vazão, visto que suas características morfométricas, geológicas, uso e ocupação do solo e principalmente as características das precipitações também são consideradas no cálculo. Cachoeiras com áreas de contribuição maiores podem apresentar vazões de cheia apenas um pouco maior que áreas de contribuição muito menores, devido principalmente à intensidade da chuva que foi calculada para uma duração igual ao tempo de concentração. Em menores áreas os valores de intensidade da chuva mostram-se maiores, o que é válido já que é mais provável que uma chuva intensa atinja integralmente uma pequena área de contribuição, ao contrário de áreas maiores, em que a chuva deve atingir apenas algumas porções.

Figura 88 - Vazão de cheia calculada para as cachoeiras em um período de retorno de 5, 10 e 50 anos.

Os intervalos de tempo de concentração e vazão de cheia adotados para estabelecer a suscetibilidade hidrológica às cheias relâmpago são mostrados no Quadro 11. A classificação das áreas de contribuição de acordo com estes intervalos pode ser observada no Quadro 12.

Parâmetro	Intervalos	Classificação de suscetibilidade
Tempo de concentração	0 - 11 min	Muito alta
	11 - 27 min	Alta
	27 - 62 min	Média
	62 - 112 min	Baixa
	112 - 194 min	Muito baixa
Vazão de cheia (TR=5 anos)	0 - 7 m ³ /s	Muito baixa
	7 - 18 m ³ /s	Baixa
	18 - 28 m ³ /s	Média
	28 - 65 m ³ /s	Alta
	65 - 119 m ³ /s	Muito alta

Quadro 12 - Intervalos de tempo de concentração e vazão de cheia adotados na classificação da suscetibilidade hidrológica.

Cachoeiras	Classificação		Cachoeiras	Classificação	
	Tc	Q _{cheia}		Tc	Q _{cheia}
Barulho	Alta	Baixa	Paraíso 1	Média	Alta
Bateia	Muito baixa	Alta	Paraíso 2	Média	Alta
Capivara do Fumal	Baixa	Muito Alta	Paraíso dos Pássaros	Muito alta	Muito Baixa
Capivara	Média	Média	Paraíso Perdido	Média	Alta
Carapuça	Média	Média	Paraíso Proibido	Média	Alta
Esmeril	Muito alta	Muito Baixa	Paraíso Selvagem 1	Alta	Baixa
Ezio	Alta	Baixa	Paraíso Selvagem 2	Alta	Baixa
Falcão	Alta	Baixa	Quilombo	Muito baixa	Muito Alta
Garrida	Média	Média	Rasga Saco	Muito baixa	Muito Alta
Grinalda	Média	Alta	Remanso	Muito baixa	Muito Alta
Lobo	Alta	Baixa	Taboão	Média	Alta
Lobo Guará	Muito alta	Muito Baixa	Taquara	Média	Alta
Oratório	Média	Média	Vitória	Alta	Baixa

Quadro 13 - Suscetibilidade hidrológica apresentada pelos valores de tempo de concentração e vazão de cheia.

A integração da suscetibilidade hidrológica do tempo de concentração com a da vazão de cheia é dada pelos critérios estabelecidos na Figura 89.

		TEMPO DE CONCENTRAÇÃO				
		MUITO ALTA	ALTA	MEDIA	BAIXA	MUITO BAIXA
VAZÃO	MUITO ALTA	muito alta	muito alta	alta	média	média
	ALTA	muito alta	alta	alta	média	baixa
	MEDIA	alta	alta	média	média	baixa
	BAIXA	média	média	média	baixa	baixa
	MUITO BAIXA	média	baixa	baixa	baixa	muito baixa

Figura 89 - Critérios adotados para determinação da suscetibilidade hidrológica.

No Quadro 13 percebe-se que na área de estudo as maiores suscetibilidades hidrológicas às cheias relâmpago encontram-se nas classificações de suscetibilidade intermediárias de ambos os parâmetros, pois tempos de concentração muito pequenos, que caracterizam alta velocidade da onda cheia, são típicos de vazões muito pequenas, enquanto que vazões altas ocorrem em áreas com grandes tempos de concentração. Desta forma, em nenhuma das cachoeiras a suscetibilidade hidrológica foi identificada como muito alta ou muito baixa. No entanto, as 7 cachoeiras identificadas com alta suscetibilidade hidrológica à ocorrência de cheias relâmpago e as 18 classificadas em média não deixam de oferecer perigo aos turistas que as frequentam. Por outro lado, a suscetibilidade hidrológica destas 25 cachoeiras classificadas como média e alta pode ser minimizada pelas suas características morfométricas desfavoráveis às cheias relâmpago, aspecto que é abordado no próximo item.

Cachoeiras	Suscetibilidade hidrológica	Cachoeiras	Suscetibilidade hidrológica
Barulho	Média	Paraíso 1	Alta
Bateia	Baixa	Paraíso 2	Alta
Capivara do Fumal	Média	Paraíso dos Pássaros	Média
Capivara	Média	Paraíso Perdido	Alta
Carapuça	Média	Paraíso Proibido	Alta
Esmeril	Média	Paraíso Selvagem 1	Média
Ezio	Média	Paraíso Selvagem 2	Média
Falcão	Média	Quilombo	Média
Garrida	Média	Rasga Saco	Média
Grinalda	Alta	Remanso	Média
Lobo	Média	Taboão	Alta
Lobo Guará	Média	Taquara	Alta
Oratório	Média	Vitória	Média

Quadro 14 - Suscetibilidade hidrológica das cachoeiras.

5.6.4 Análise integrada das suscetibilidades

De posse dos resultados apresentados nos Quadros 10 e 13, suscetibilidade morfométrica e hidrológica, uma classificação final da suscetibilidade à ocorrência de cheias relâmpago nas cachoeiras da área de estudo foi elaborada, de acordo com os critérios da Figura 90.

SUSCETIBILIDADE MORFOMÉTRICA	SUSCETIBILIDADE HIDROLÓGICA			
		ALTA	MEDIA	BAIXA
	MUITO ALTA	muito alta	muito alta	média
	ALTA	alta	alta	média
	MEDIA	alta	média	média
	BAIXA	média	média	baixa
	MUITO BAIXA	baixa	baixa	baixa

Figura 90 - Critérios adotados para determinação da suscetibilidade às cheias relâmpago pela combinação da suscetibilidade hidrológica e morfométrica.

Finalmente, foram determinados os níveis de suscetibilidade das cachoeiras quanto à ocorrência de cheias relâmpago, como pode ser observado no Quadro 14. Considerando as 26 cachoeiras, 6 foram classificadas em muito alta, são elas: Barulho, Esmeril, Falcão, Lobo, Lobo Guará e Paraíso dos Pássaros. Entretanto, um número elevado (11 cachoeiras) foi classificado como alta, por apresentarem tempo de concentração um pouco maior que as cachoeiras classificadas com suscetibilidade muito alta, porém com uma vazão bastante superior. Assim, tanto as cachoeiras classificadas como de potencial muito alto quanto alto de ocorrência de cheias relâmpago merecem atenção e procedimentos especiais de alerta aos usuários, a fim de evitar acidentes.

As cachoeiras classificadas em média suscetibilidade à ocorrência às cheias relâmpago não se mostram muito preocupantes, visto que as suscetibilidades hidrológica e morfométrica foram identificadas como equivalentes, alta e baixa, desta forma uma condição acaba por minimizar a outra, com exceção das cachoeiras Carapuça e Garrida que apresentam níveis médios tanto na classificação de suscetibilidade hidrológica quanto morfométrica.

Em relação às cachoeiras que apresentam baixa suscetibilidade, foram classificadas apenas 4, Bateia, Rasga Saco, Quilombo e Remanso (Quadro 14). Estas cachoeiras apresentam alta vazão de cheia, no entanto, altos tempos de concentração, além de

extensas áreas de planície que acumulam a vazão excedente durante eventos de chuva intensa.

Cachoeiras	Suscetibilidade à cheia relâmpago	Cachoeiras	Suscetibilidade à cheia relâmpago
Barulho	Muito alta	Paraíso 1	Alta
Bateia	Baixa	Paraíso 2	Alta
Capivara do Fumal	Média	Paraíso dos Pássaros	Muito alta
Capivara	Alta	Paraíso Perdido	Alta
Carapuça	Média	Paraíso Proibido	Alta
Esmeril	Muito alta	Paraíso Selvagem 1	Alta
Ezio	Alta	Paraíso Selvagem 2	Alta
Falcão	Muito alta	Quilombo	Baixa
Garrida	Média	Rasga Saco	Baixa
Grinalda	Média	Remanso	Baixa
Lobo	Muito alta	Taboão	Alta
Lobo Guará	Muito alta	Taquara	Média
Oratório	Alta	Vitória	Alta

Quadro 15 - Suscetibilidade às cheias relâmpago nas cachoeiras mapeadas na área de estudo.

5.7 Carta de suscetibilidade a incêndios

A elaboração deste produto mostra-se válida, à medida que determina períodos do ano e áreas em que a suscetibilidade à ocorrência de incêndios na área de estudo é maior, facilitando ações de monitoramento em períodos e áreas específicas.

A suscetibilidade à ocorrência de incêndios foi avaliada nos meses em que ocorre o maior número de incêndios, julho, agosto, setembro e outubro, como pode ser observado na Figura 91. Estes dados são referentes ao monitoramento de focos de incêndios realizado pelo INPE, que recebe dados de diferentes satélites. Durante o período escolhido para análise (2004 -2013) ocorreram 1154 focos de incêndios na área de estudo.

Os poucos focos de incêndios registrados nos meses de novembro, janeiro, fevereiro são quase que em sua totalidade causados por raios, mas como ocorrem no período chuvoso não queimam grandes áreas. Por outro lado, nos meses de agosto e setembro é registrado um número muito elevado de focos. Neste período são comuns queimadas para renovação das pastagens, principalmente as pastagens naturais, que acabam por evadir-se do controle. Segundo Medeiros e Fiedler (2004) as ações antrópicas são responsáveis pela maioria dos incêndios causados no Parque Nacional Serra da Canastra, com cerca de 47%

sendo provocados por incendiários, 23% pela queima de pastagens e 30% por causas não identificadas.

Figura 91 - Número mensal de focos de incêndios no período 2004/2013. Fonte: INPE (2013).

Os pesos adotados para a elaboração das cartas de suscetibilidade podem ser observados na Tabela 31. O atributo uso e ocupação do solo foi considerado o mais importante e recebeu o maior peso, 35, pois o fogo não ocorre sem a presença de material combustível. As classes de uso e ocupação do solo, mineração, erosão e solo exposto, não foram ponderadas na análise, sendo inseridas diretamente nas cartas de suscetibilidade a incêndios como áreas não suscetíveis devido à ausência ou pouca quantidade de material combustível.

As variáveis climáticas, precipitação e evapotranspiração, receberam peso 13 e a deficiência hídrica, considerada o segundo fator mais influente na análise, peso 19. O menor peso foi atribuído à radiação solar, 5. A integração das variáveis climáticas à análise foi o que possibilitou a diferenciação dos graus de suscetibilidade nos diferentes meses, pois os demais atributos apresentam as mesmas características independentes das condições climáticas, exceto o uso e ocupação do solo devido à influência da umidade sobre o material combustível.

A importância das classes do atributo declividade foi atribuída conforme o aumento da inclinação, entretanto à classe com inclinação superior a 28° recebeu o menor peso,

uma vez que esta inclinação ocorre principalmente em escarpamentos rochosos, onde a vegetação é pouco densa ou escassa.

Tabela 31- Pesos dos atributos e suas respectivas classes quanto à influência sobre a suscetibilidade a incêndios.

Atributos	Peso do atributo	Classes	Classificação	Peso da classe
Declividade	8	0-6°	Baixa	1
		28-62°		
		6-13°	Moderada	2
		13-28°	Alta	3
Hipsometria	7	745-994	Baixa	1
		994-1190	Moderada	2
		1190-1449	Alta	3
Uso e ocupação do solo	35	Campo	Alta	3
		Pastagem	Moderada	2
		Culturas		
		Silvicultura	Baixa	1
		Campo arbustivo		
		Mata		
		Mineração	Inexistente	0
		Erosão		
Precipitação total mensal	13	Solo exposto		
		>75 mm	Baixa	1
		75-25 mm	Moderada	2
Evapotranspiração potencial	13	<25 mm	Alta	3
		<70 mm	Baixa	1
		70-100 mm	Moderada	2
Deficiência hídrica	19	>100 mm	Alta	3
		<10 mm	Baixa	1
		10-15mm	Moderada	2
Radiação solar	5	>15 mm	Alta	3
		<130.000 WH/m ²	Baixa	1
		130.000-145.000 WH/m ²	Moderada	2
		>145.000 WH/m ²	Alta	3

Por fim, a combinação destas variáveis permitiu a elaboração de cartas de suscetibilidade a incêndios para os meses de julho a outubro, como pode ser observado na Figura 92 e Apêndice H.

Figura 92 - Cartas de susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

Conforme pode ser observado nas Figuras 92 e 93, os meses de agosto e setembro se mostram mais suscetíveis à ocorrência de incêndios. Nestes meses as classes alta e muito alta ocupam aproximadamente 80% da área de estudo, devido essencialmente às extremas condições climáticas, alta deficiência hídrica, ausência ou baixa ocorrência de chuvas e médios índices de evapotranspiração potencial que configuram a cobertura do solo alta capacidade de combustão.

No mês de julho percebe-se uma percentagem bastante considerável ocupada pela classe alta, 60%, pois neste período a deficiência hídrica também apresenta valores elevados e a ocorrência de chuvas é muito baixa. O cenário no mês de julho somente não é mais problemático devido aos baixos índices de evapotranspiração potencial, ocasionados pela baixa temperatura, ao contrário do mês de outubro onde o único fator climático deflagrador à ocorrência de incêndio é a evapotranspiração potencial, que apresentada maiores valores com o aumento da temperatura.

Figura 93 - Distribuição percentual das classes de suscetibilidades a incêndios das cartas mensais da área de estudo.

A partir das ocorrências de focos de incêndios de julho, agosto, setembro e outubro, no período 2004 a 2013, foi possível validar as cartas elaboradas. De acordo com gráfico exibido na Figura 94, pode-se entender que as cartas são razoavelmente válidas, visto que os focos de incêndios estão majoritariamente localizados nas classes mais críticas à ocorrência de incêndios, ressaltando que a carta do mês de julho não apresenta a classe alta e de outubro as classes alta e muito alta.

No mês de agosto e principalmente setembro, percebe-se uma percentagem considerável de focos localizados nas classes baixa e muito baixa, localizadas principalmente nas regiões mais planas. Possivelmente esta situação não é devido às incoerências dos produtos elaborados e sim fazem referência às queimadas em pastagens plantadas que se estendem para as áreas próximas devido à falta de controle.

Figura 94 - Número percentual dos focos de incêndios nas classes das cartas de suscetibilidade à ocorrência de incêndios.

5.8 Carta de predisposição a movimentos de massa

Na elaboração deste produto cartográfico buscou-se mapear áreas predispostas a movimentos de massa específicos, que ocorrem na área de estudo e foram identificados em campo, queda e tombamento de blocos rochosos e escorregamento em tálus.

Na Figura 95 é apresentada a carta de predisposição a movimentos de massa sobreposta ao MDE sobrelevado. Este produto é o resultado da combinação das áreas de ocorrência da litologia quartzito com a classe de declividade superior a 20° . Entende-se que os movimentos do tipo queda e tombamento de blocos ocorrem em ângulos próximos a 90° , enquanto o escorregamento em depósitos de tálus, quando formados por blocos de quartzito, ocorrem em inclinações entre 30° a 40° , dependendo das condições que este material é encontrado conforme identificado por Burkalow (1945). Além dessas considerações a adoção da inclinação 20° teve por base a pouca precisão da carta de declividade em representar terrenos muito íngremes devido à escala das cartas topográficas utilizadas (1:50.000), conforme explanado no item 5.2.

Sobre a abrangência das áreas que apresentam predisposição a movimentos de massa, estas ocorrem em 15% de toda área de estudo. Os pontos inseridos na Figura 95 foram identificados e descritos em campo, devido a sua abrangência e à magnitude dos danos causados caso o processo seja desencadeado, visto à proximidade das vias de acesso e pontos turísticos. Outros inúmeros processos foram identificados, mas devido a sua pequena extensão ou baixa vulnerabilidade humana, pela localização distante de vias de acesso e pontos turísticos, não foram descritos.

Figura 95 - Carta de predisposição a movimentos de massa sobreposta ao MDE sombreado.

5.8.1 Descrição dos pontos de movimentos de massa

5.8.1.1 Ponto-a

O complexo de cachoeiras Paraíso Perdido está localizado em uma área onde os blocos rochosos dos taludes apresentam - se bastante instáveis (Figura 96 e 97). O trecho instável possui uma extensão aproximada de 200 m, sendo constituído por blocos de quartzito maciço, resultantes de metamorfismo termal apresentando pouca ou nenhuma foliação. Os blocos possuem forma retangular, dimensões que variam de 0,5 m a 2,0 m e constituem taludes de altura também variável, 6 a 25 m. Os blocos mais instáveis estão depositados no topo do talude rochoso, não havendo preenchimento no contato entre os blocos.

Na ocorrência de rolamento e/ou escorregamento dos blocos parte da trilha que liga as cachoeiras será interditada, bem como parte do leito do rio.

Figura 96 - Blocos instáveis ao longo do leito do rio formado por taludes rochosos.

Figura 97 - Trecho da trilha de acesso às cachoeiras com blocos rochosos sujeitos a escorregamento.

5.8.1.2 Ponto-b

A rodovia de tráfego periódico Palmeiras, que dá acesso ao letreiro, possui um trecho de cerca de 500 metros com predisposição ao tombamento de blocos do talude de corte de aproximadamente 10 metros de altura. A rocha que constitui o talude mostra-se sã, porém fraturada, por onde não ocorre o fluxo de água. As fraturas presentes no talude de quartzito possuem direção geológica 45° NW e ângulo de mergulho 65° SW, ângulo este favorável ao tombamento como pode ser observado nas evidências existentes na base do talude (Figura 98).

A interdição total ou parcial do acesso pode ocorrer dependendo da extensão dos novos tombamentos que venham a ocorrer.

Figura 98 - Tombamento em talude de corte.

5.8.1.3 Ponto-c

O trecho da rodovia de tráfego periódico São João Batista do Glória - Babilônia, pela pousada Boa Esperança, é afetado pela possibilidade de rolamento de blocos rochosos, estende-se por aproximadamente 400 metros (Figura 99). O talude possui uma altura média de 30 m, sendo constituído por blocos de quartzito de tamanhos variados, blocos pequenos e outros com até 5 metros de diâmetro. Alguns blocos instáveis estão localizados no próprio talude e outros na sua base, apresentando formas arredondadas ou retangulares, sendo que os blocos situados na base do talude encontram-se em contato com o solo.

No caso do rolamento de blocos pode ocorrer a interdição da via de acesso e destruição da moradia localizada logo abaixo.

Figura 99 - Rolamento de blocos rochosos próximos à rodovia de tráfego periódico.

5.8.1.4 Ponto-d

Na rodovia de tráfego periódico São João Batista do Glória - Canteiros há um trecho com possibilidade de escorregamento de 200 m de extensão, aproximadamente. O talude de corte apresenta altura variando de 3 a 5m, sendo formado pelo material mobilizado do escarpamento de quartzito localizado acima do talude (Figura 100). Este material é composto por fragmentos de quartzito de diversos tamanhos, mas não ultrapassando 30 cm, e solo, que possui características texturais bastante distintas, constituindo assim um depósito de tálus.

Como o material possui características bem variáveis, observa-se ao longo do talude erosão diferenciada, bem como evidências de escorregamentos de pequena proporção (Figura 101). Na ocorrência de escorregamentos com maiores dimensões a via de acesso pode ser interditada, sendo mais provável em períodos chuvosos devido à diminuição da resistência ao cisalhamento do solo que envolve os fragmentos rochosos.

Figura 100 - Talude de corte em depósito de tálus.

Figura 101 - Vista transversal do talude evidenciando pequenos escorregamentos.

5.8.1.5 Ponto-e

A mesma rodovia de tráfego periódico acima, São João Batista do Glória - Canteiros, apresenta outro trecho com grande instabilidade ao tombamento e/ou queda de blocos. No talude de 15 metros de altura, constituído de quartzito, existem blocos menores com aproximadamente 30 cm que se mostram susceptíveis à queda e também um bloco de maior dimensão com inclinação para um provável tombamento (Figura 102).

Quanto às consequências para o caso dos processos ocorrerem, a queda dos blocos menores não deve levar a interdição total do acesso ao contrário do tombamento do bloco de maior dimensão.

Figura 102 - Rodovia de tráfego periódico próxima a talude com blocos instáveis ao tombamento e à queda.

5.8.1.6 Ponto-f

A rodovia de tráfego periódico localizada no Vale do Ribeirão da Bateia apresenta um trecho de aproximadamente 3 Km com problema de estabilidade de talude. Os blocos de quartzito possuem forma retangular, com tamanho variando de 0,5 a 2,0 m, e estão localizados no topo do talude de rocha e imersos no solo da parte inferior da encosta, havendo tanto contato rocha/ rocha dos blocos quanto rocha/ solo (Figura 103). Os blocos mais instáveis localizam-se na porção superior da encosta que atinge cerca de 30 metros de altura.

Na extensão do trecho afetado observam-se várias evidências de rolamento de blocos, tanto acima de via de acesso quanto abaixo. Em caso de novos processos de rolamento, pode haver a interdição da via de acesso, dependendo do tamanho dos blocos e da quantidade de energia envolvida.

Figura 103 - Instabilidade de blocos rochosos no vale da Bateia.

5.8.1.7 Ponto-g

No atrativo turístico Condomínio das Pedras ocorrem trechos com possibilidade de rolamento e/ou queda de blocos rochosos (Figura 104). O talude de 20 m de altura é constituído por blocos de quartzito formados por erosão diferencial. Os blocos mais instáveis estão localizados no topo do talude e também na base, sendo o contato rocha/rocha ou rocha/solo. Os blocos possuem formas retangulares e arredondadas e medem entre 0,5 a 5 metros.

Na base do talude observam-se indícios de instabilidade. Caso ocorram novos processos com os blocos de maiores dimensões a via pode ser totalmente interditada.

Figura 104 - Instabilidade de blocos rochosos no Condomínio das Pedras.

5.9 Carta de potencialidades e restrições ao uso turístico

A elaboração da carta de potencialidades e restrições ao uso turístico mostra-se importante à medida que integra várias informações, antes apresentadas separadamente nos produtos intermediários. Este documento expõe níveis de adequabilidade das bacias hidrográficas ao uso turístico.

Inicialmente os produtos intermediários foram associados para a elaboração de chaves de codificação que representam os diferentes graus de suscetibilidade e restrições das bacias hidrográficas. Em seguida, as chaves de codificação foram agrupadas em níveis semelhantes, diferenciando-se assim, bacias mais restritivas, inadequadas ao uso turísticos, de bacias com maior potencialidade para este uso.

Desta forma, para a avaliação integrada das potencialidades e restrições das bacias hidrográficas para fins turísticos, foram considerados os seguintes planos de informação: trafegabilidade, restrição à implantação de vias de acesso, suscetibilidade à inundação de planícies, predisposição a movimentos de massa, suscetibilidade à ocorrência de incêndios e suscetibilidade à erosão, conforme citado nos aspectos metodológicos, item 4.2.4.6.

Foram obtidos os valores médios de cada plano de informação por bacia hidrográfica, lembrando que o método adotado para a compartimentação das bacias hidrográficas envolveu o agrupamento de bacias de ordens inferiores a que estava sendo compartimentada, portanto os valores médios encontrados para cada bacia hidrográfica fazem referência a toda sua área de contribuição, formada sempre por bacias de menor ordem. A partir das séries de valores médios obtidas para cada bacia hidrográfica, foram adotados os mesmos intervalos utilizados na classificação dos níveis de suscetibilidades e restrições dos produtos intermediários para discretização das bacias hidrográficas.

Como as cartas de predisposição a movimentos de massa e restrição à implantação de vias apresentam apenas 2 níveis de classificação, ou seja, áreas que são ou não restritivas, adotou-se como critério para discretização das bacias hidrográficas o percentual de área com predisposição ou restrição ocupado em cada bacia. No caso das cartas de trafegabilidade e suscetibilidade a incêndios, que foram elaboradas para diferentes períodos, escolheu-se para esta análise final as que representavam as condições mais críticas, trafegabilidade do período úmido e suscetibilidade a incêndios no mês de agosto.

Em relação à carta de suscetibilidade à erosão, elaborada por Magri (2013), que apresentava apenas 3 níveis de suscetibilidade na área de estudo, foram mantidos os

mesmos intervalos de classes para classificação dos valores médios encontrados por bacias hidrográficas.

A espacialização das bacias hidrográficas classificadas em diferentes níveis de suscetibilidades e restrições pode ser observada na Figura 105. A carta de suscetibilidade à inundação de planícies não é apresentada por já ter sido elaborada por bacias hidrográficas, assim não foi necessário generalizar as informações para o nível de bacias, como ocorreu com os demais produtos cartográficos intermediários.

A generalização das informações em nível de bacias hidrográficas permitiu uma interpretação do comportamento geral das bacias quanto aos processos e restrições da área de estudo. É importante lembrar que os produtos cartográficos intermediários, apresentados nos itens anteriormente desta pesquisa, representam a informação mais detalhada que pode ser necessária a outros estudos.

De posse dos códigos que representam os níveis de suscetibilidade e restrições das bacias hidrográficas a diferentes processos, a chave de codificação de cada bacia foi elaborada, como no exemplo da Figura 106. As demais chaves de codificação das bacias hidrográficas inseridas na área de estudo podem ser observadas no Apêndice I.

Figura 106 - Chave de codificação das bacias hidrográficas em relação às suas suscetibilidades e restrições analisadas.

Procurando integrar as bacias hidrográficas que exibem níveis de restrições e potencialidades semelhantes, foram adotados critérios para a determinação das diferentes classes de adequabilidade das bacias ao uso turístico, de acordo com as suas chaves de codificação, são eles:

- Bacias hidrográficas totalmente adequadas: quando os 6 atributos analisados apresentam-se iguais ou inferiores a 2, incluindo a suscetibilidade à erosão;
- Bacias hidrográficas adequadas: quando 4 atributos, dos 6 analisados, apresentam-se iguais ou inferiores a 2, incluindo a suscetibilidade à erosão;

- Bacias hidrográficas semi-adequadas: quando 4 atributos, dos 6 analisados, apresentam-se iguais ou superiores a 3, incluindo a suscetibilidade à erosão quando o nível de classificação é igual ou superior a 2;
- Bacias hidrográficas inadequadas: quando 4 atributos, dos 6 analisados, apresentam-se iguais a 4 ou 5, incluindo a suscetibilidade à erosão quando o nível de classificação é igual a 2 ou 3;
- Bacias hidrográficas totalmente inadequadas: quando todos os 6 atributos analisados apresentam-se iguais a 5, incluindo a suscetibilidade à erosão quando o nível de classificação é igual a 3.

Em alguns casos houve equivalência dos atributos na classificação de bacias adequadas e semi-adequadas. Foi utilizado como critério de classificação o número de atributos com valor igual ou superior a 4.

- Bacias hidrográficas semi-adequadas: quando 1 atributo é igual a 5 ou 2 são iguais ou superiores a 4;
- Bacias hidrográficas adequadas: quando nenhum atributo é igual ou superior a 4.

A distribuição espacial da classificação das bacias hidrográficas pode ser observada na Figura 107 e Apêndice J. Nota-se que nenhuma das bacias hidrográficas foi classificada como totalmente inadequada ou adequada ao uso turístico, visto que a combinação dos atributos analisados não se apresentou totalmente inadequada ou adequada em nenhuma bacia. De acordo com a Tabela 32, a maior parte das bacias hidrográficas da área enquadram-se como semi-adequada ou inadequada ao uso turístico frente aos atributos considerados.

Tabela 32 - Distribuição percentual das bacias hidrográficas em relação as suas potencialidades e limitações ao uso turístico.

Classes	Percentual (%)
Adequadas	19,4
Semi-adequadas	49,4
Inadequadas	31,2

Figura 105 - Classificação das bacias hidrográficas em relação às suas susceptibilidades e restrições analisadas.

Figura 107 - Carta de potencialidades e restrições das bacias hidrográficas ao uso turístico.

6 CONCLUSÕES

6.1 Metodologia/métodos utilizados

- O uso de ortofotocartas e fotografias aéreas mostrou-se bastante problemático na elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo, devido à baixa qualidade destes produtos (efeitos de vitela, raios de sol, diferença de contrastes em alvos iguais) e extensão da área de estudo. Estes problemas levaram a digitalização manual das classes, com exceção da classe mata, o que demandou muito tempo. A segmentação das ortofotocartas para mapeamento da classe mata no software ENVI EX, seguida da classificação orientada ao objeto, apresentou bons resultados. As ferramentas existentes no programa permitiram separar a classe mata das demais sem gerar confusão espectral com outros alvos.
- As ferramentas do algoritmo HAND, implementadas na versão IDL do software ENVI, mostraram-se bastante satisfatórias na correção hidrológica do modelo digital de elevação, sendo a aplicação das ferramentas mais fácil que as existentes no software ArcGIS 10.1. Em relação ao modelo HAND, é importante considerar que a variação geomorfológica da região exerceu grande influência sobre a sua qualidade. A definição do mesmo limiar de área acumulada para a geração da rede de drenagem de toda a área de estudo ocasionou, em alguns trechos, o surgimento de canais que não existem ou ao não surgimento em locais que existem canais mapeados, visto que a densidade de drenagem é inerente à geomorfologia do terreno.
- A elaboração das cartas de trafegabilidade para distintas condições climáticas, seca e úmida, mostrou-se bastante adequada, devido à alteração da resistência dos solos nestas condições, principalmente sobre os solos arenosos e silto-argilosos característicos da área de estudo.
- A integração das variáveis climáticas à análise de suscetibilidade à ocorrência de incêndios possibilitou a diferenciação dos graus de suscetibilidade em diferentes meses, já que os demais atributos apresentam as mesmas características independentes das condições climáticas. O confronto dos focos de incêndios

ocorridos no mês relativo a cada carta mostrou-se como uma boa forma para a validação as cartas elaboradas.

- O método adotado para identificação das planícies suscetíveis à inundação mostrou-se viável, pois as áreas levantadas condizem com fundos de vale, observados em campo como inundáveis.
- A generalização das informações contidas nos produtos cartográficos intermediários para o nível de bacias hidrográficas não permitiu o adequado estabelecimento de unidades homogêneas do ponto de vista geoambiental, uma vez que apenas os processos hidrológicos são bem representados por esse tipo de compartimentação. Apesar disto, permitiu uma visão geral sobre o comportamento predominante em cada bacia e assim diferenciá-las umas das outras.

6.2 Produtos obtidos

A elaboração de mapas de uso e ocupação do solo de diferentes períodos possibilitou compreender parcialmente a evolução do uso do solo na área de estudo, já que em 1964, período mais remoto que foi possível obter fotografias aéreas, a região já apresentava muitas áreas com intervenção antrópica. De maneira geral, o mapeamento do uso e ocupação do solo em 1964, 1989 e 2009 mostrou que houve uma pequena melhora na preservação da área com o decorrer do tempo, principalmente sobre as formações florestais.

Por meio do mapeamento das vias de acesso existentes em 1989 e 2009, constatou-se que a extensão das vias aumentou pouco neste período. As rodovias de tráfego periódico tiveram um aumento um pouco mais significativo que os caminhos/trilhas. Quanto aos impactos negativos causados ao meio físico, conclui-se que as rodovias de tráfego periódico são mais preocupantes quanto ao desenvolvimento de processos erosivos que os caminhos/trilhas, devido a sua localização sobre materiais inconsolidados mais suscetíveis à erosão. Entretanto, os caminhos/trilhas podem ser deflagradores de outros impactos pela concentração do escoamento superficial, como assoreamento dos corpos d'água, aumento da turbidez e vazão dos rios.

As cartas de trafegabilidade mostram que no período chuvoso mais da metade da área apresenta trafegabilidade ruim ou muito ruim, enquanto que no período seco 65% da área mostra-se trafegável.

Quanto à carta de restrição à implantação de vias de acesso, a combinação da frequência de canais de drenagem com a densidade de vias de acesso mostrou que 25% da área de estudo deve ser evitada para a implantação de vias, principalmente caminhos/trilhas, pelo grande número de confluências que pode ser gerado devido à alta frequência de canais de drenagem.

As porções correspondentes a fundos de vale apresentam suscetibilidade à inundação de planícies muito alta (Bateia, Guarita, Babilônia e Cândidos). No total, 32 % dos baixos topográficos apresentam suscetibilidade muito alta ou alta à inundação. A avaliação da suscetibilidade à ocorrência de cheias relâmpago nas cachoeiras permitiu a identificação das cachoeiras Barulho, Esmeril, Falcão, Lobo Guará, Lobo e Paraíso dos Pássaros como as mais suscetíveis.

A análise dos focos de incêndios ocorridos na área possibilitou a elaboração das cartas de suscetibilidade à ocorrência de incêndios apenas para os meses em que os focos de incêndios são mais recorrentes. A carta de suscetibilidade a incêndios de agosto, mês em que ocorre o maior número de focos de incêndios, apresentou suscetibilidade alta e muito alta em aproximadamente 80% da área de estudo, devido fundamentalmente às extremas condições climáticas características deste mês.

A elaboração da carta de predisposição a movimentos de massa mostrou que 15% da área de estudo apresenta predisposição natural à queda ou tombamento de blocos rochosos ou escorregamento em talus.

Quanto ao produto final, carta de potencialidades e restrições ao uso turismo, identificou-se as bacias hidrográficas mais adequadas para esta finalidade. Nenhuma das bacias mostrou-se totalmente adequada ou totalmente inadequada, no entanto 81% das bacias inseridas na área de estudo foram classificados como semi-adequadas ou inadequadas e apenas 19% como adequadas.

Apesar dos resultados apontarem muitas bacias hidrográficas como semi-adequadas ou inadequadas, prevalecendo condições de restrição ao uso turístico da área de estudo, não, necessariamente, estas bacias devem ser inviabilizadas para o turismo. A partir dos produtos intermediários, que apresentam suscetibilidades e restrições da área, o uso turístico da área pode ser melhor planejado, de modo que os impactos negativos ao meio físico sejam minimizados. Abaixo seguem algumas medidas que podem ser adotadas:

- Em áreas de alta densidade de confluências, cruzamentos de vias/canais de drenagem, devem ser implantados estruturas dissipadoras de energia para diminuir a velocidade que o escoamento superficial atinge o canal fluvial;
- Melhorar os sistemas de drenagem das vias de acesso com a instalação de bacias de acumulação de água ao longo das vias;
- Realização de obras de contenção nas áreas mais suscetíveis a tombamento ou queda de blocos, principalmente nos pontos descritos no item 5.8.1;
- Intensificar o monitoramento das áreas suscetíveis à ocorrência de incêndios nos meses de julho, agosto e setembro;
- Adotar sistemas de alerta às cheias relâmpagos nas cachoeiras mapeadas com suscetibilidade alta e muito alta;
- Fiscalizar a implantação de vias de acesso nas áreas de alta densidade de drenagem, principalmente a abertura de trilhas por praticantes de motocross.

6.3 Estudos futuros

Em relação aos estudos futuros, sugere-se:

- Elaborar o modelo HAND separadamente por unidades geológicas e determinar um limiar de drenagem condizente com a densidade de drenagem de cada unidade geológica, a fim de amenizar o problema citado no item 6.2.
- Considerar na elaboração das cartas de trafegabilidade as características de diferentes tipos de veículos. No caso da área de estudo, a diferenciação das cartas em destinadas a veículos traçados e comuns seria suficiente.
- Realizar o mapeamento das áreas de campo que são utilizadas como pastagem para a pecuária leiteira. A integração destas áreas à análise de suscetibilidade à ocorrência de incêndios seria bastante útil, visto que o fogo é forma de manejo destas áreas, tornando as regiões do entorno muito suscetíveis a incêndios.
- Avaliar a suscetibilidade à ocorrência de cheias relâmpago não apenas nas áreas de contribuição das cachoeiras, mas também em todas às bacias inseridas na área de estudo, ou pelo menos, nas bacias que são interceptadas pelas principais vias de acesso.

REFERÊNCIAS

ANGILLIERI, M. Y. E. Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina. **Quaternary International**, v. 1, n. 253, 2011, p. 74-79.

ARAGÃO, R.; SANTANA, G. R., COSTA, C. E. F. F.; CRUZ, M. A. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, 2013, p. 243-252.

ARAÚJO, E. L. S. **Geoturismo: Conceptualização, Implementação e Exemplo de Aplicação ao Vale do Rio Douro no Sector Porto-Pinhão**. 2005. 213 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de Minho, Braga.

AUGUSTO FILHO, O. Sistemas de Informações geográficas aplicados à engenharia ambiental. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. (Eds). **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012, p. 643 - 667.

AUGUSTO FILHO, P. Caracterização Geológica Geotécnica voltada a estabilidade de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. **Anais da Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro: ABMS/ABGEPCRJ. v. 2. 1992. p. 721-733.

BAJABAA, S.; MASOUND, M.; AL-AMRI, M. 2013. Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). **Arabian Journal of Geosciences**, DOI 10.1007/s12517-013-0941-2. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12517-013-0941-2#page-1>. Acesso em: 19 de março de 2014.

BELL, F. G. **Engineering Geology**. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2007, 581 p.

BELTREME, A. M. K. Mapeamento da cobertura do solo ao longo da faixa de domínio de trem metropolitano: Linha F em São Paulo. 2008. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BISPO, P. C.; VALERIANO, M. M. Efeitos de métodos de classificação e de escalas de mapeamento na percepção das relações entre geomorfometria local e classes de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais eletrônicos do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, 2009. Disponível em:

<<http://mart.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.16.07.01/doc/2587-2594.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2014.

BLAMEY, R.K. Principles of Ecotourism. In: WEAVER, D.B. (Ed.). **The Encyclopedia of Ecotourism**. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2001, p. 5-22.

BRASIL. **Diretrizes para uma política nacional de ecoturismo**. Brasília: MICT/MMA-EMBRATUR/ IBAMA, 1994.

BRASIL. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 de out. 2012.

BRILHA, J. **Patrimônio Geológico e Geoconservação: A Geoconservação da natureza na sua vertente geológica**. Braga: Palimage Editores, 2005, 190 p.

BURKALOW, A. V. Angle of repose and angle of sliding friction: An experimental study. **Bulletion of Geological Society of America**, v. 56, 1945, p. 669-708.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001, p 2/1 - 2/35. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 15 jul. 2012.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001, p 2/1 - 2/35. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 15 jul. 2012.

CÂMARA, G.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C.; ALMEIDA FILHO, R.; BÖNISCH, S. 2001. Técnicas de inferência geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE. p 9/1-9/48. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 15 jul. 2012.

CARDOSO, C.O.; ULLMANN, M. N.; BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, 1998, p. 131-140.

CARVALHO, R. G. **Obtenção da curva de intensidade-duração-frequência (IDF) de chuvas intensas para a bacia hidrográfica do Igarapé Murupu, Boa Vista - PR**. 2007. 133 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Roraima, Boa Vista.

CASTRO, C.F.; SERRA, G.; PAROLA, J.; REIS, J.; LOURENÇO, L.; CORREIA, S. **Combate a incêndio florestais**. v. XIII. 2 ed. Portugal: Sintra, 2002, 94 p.

CATELANI, S. C.; BATISTA, G. T.; TARGA, M. S. 2005. Geoprocessamento na determinação da proximidade de estradas vicinais em relação à rede de drenagem em uma bacia hidrográfica no Município de Taubaté, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 2005, Goiânia. **Anais eletrônicos do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia: INPE, 2005. Disponível em: <<http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.11.26/doc/3723.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

CAVALCANTE, M. B. Ecoturismo no Brasil, visita à natureza. **Mundo Jovem**, v. 369, 2006, p. 02 - 02.

CAVALHO, R. M. **Caracterização das atividades antrópicas e de uso dos recursos hídricos nas sub-bacias hidrográficas do Médio rio Grande**. 2012. 112 p. Monografia (Engenharia Ambiental) - FESP/UEMG, Passos.

CEBALLOS-LASCURAIN, H. 1987. The future of 'ecotourism'. **Mexico Journal**, January, 1987, p. 13-14.

CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. Informática. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p. 227-241.

CENDRERO, A.; DÍAZ DE TERÁN, J. R. The environmental map system of the University of Cantabria, Spain. In: ARNDT, P; LÜTTIG, G. (Eds). **Mineral resources extraction, environmental protection and land-use planning in the industrial and developing countries**. Stuttgart, 1987, p. 149-181.

CERRI, L. E. S. Carta geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, 1990, Salvador. **Anais 6º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**. Salvador: ABGE, v.1, 1990, p. 309-317.

CÉSAR, P. A. B.; STIGLIANO, B. V.; RAIMUNDO, S.; NUCCI, J. C. **Ecoturismo: caminhos do futuro**. São Paulo: IPSIS, 2007, 18 p.

CHAVAN, M. E.; DAS, K. K.; SURYAWANSHI, R. S. Forest fire risk zonation using Remote Sensing and GIS in Huynial watershed, Tehri Garhwal district, UA. **International Journal of Basic and Applied Research**, v. 02, 2012, p. 6-12.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981, 188 p.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R.G. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, n. 2, 1989, p. 147-159.

COSTA, V. C. **Proposta de manejo e planejamento ambiental de trilhas ecoturísticas: Um estudo no maciço da Pedra Branca - Município do Rio de Janeiro (RJ)**. 2006. 381 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro.

CPRM. 2013. **Projeto Geoparques**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 4 fev 2013.

CUNHA, M. A. **Ocupação de encostas**. São Paulo: IPT, 1991, 213 p.

DAEE - Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. *Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas*. São Paulo, 2005, 116 p. Disponível em: <<http://www.daee.sp.gov.br/outorgaefiscalizacao/guia/capitulo01.pdf>>. Acesso em: 27 mar 2014.

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S.; ROSSKOFF, J. L. C. Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, 2010, p. 46-54.

DEPARTMENT OF THE ARMY. **Planning and Design of Roads, Airbases, and Heliports in the Theater of Operations - Road Design**. Washington: Departments of the Army and the Air Force, v.1, 1994, p. 7-1; 9-36.

DIAS, C. C. **Avaliação geoambiental da região do Médio rio Grande**. 2013a. 410 p. v. 1. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - EESC/USP, São Carlos.

DIAS, C. C. **Caracterização climática do médio rio Grande**. Passos: FESP/UEMG, 2013b. (Relatório Técnico - Científico - Projeto Grande Minas: União pelas águas).

DINIZ, N. C. Cartografia geotécnica por classificação de unidades de terreno e avaliação de suscetibilidade e aptidão. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 2, nº 1, 2012, p. 29-77.

EASTMAN, J. E. **Manual ao usuário: Introdução e exercícios tutoriais**. Versão em português para o Idrisi for Windows. Eds: Hasenack, H; Weber, E. 1998. UFRGS: Centro de Recursos Idrisi, 1992, 224 p.

EICHRODT, A. W. **Development of a spatial Trafficability Evaluation System**. 2003. p. 184. PhD Thesis Iwiss (Federal Institute of Technology Zurich) - Zurich, Switzerland.

ENVI. **ENVI Feature Extraction Module User's Guide**. 2008. 78 p. Disponível em: http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/feature_extraction_module.pdf. Acesso em: 5 mar. 2013.

ESRI. 2012. **What is GIS?** Disponível em: <http://www.esri.com/what-isgis/overview#overview_panel>. Acesso em: 14 jan 2013.

_____. 2014a. How Topo to Raster works. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#/How_Topo_to_Raster_works/009z0000007m000000/>. Acesso em: 5 fev. 2014.

_____. 2014b. Classifying numerical fields for graduated symbology. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#/00s50000001r000000>. Acesso em: 6 out. 2013.

EVANS, I. S. **The selection of class intervals**. Transactions of the Institute of British Geographers, 2, 1977, p. 98-124.

FENNELL, D.A. **Ecotourism in Canada**. Analyst of Tourism Research. v. 25, p. 231-235, 1998.

FEOLA, E. **Análise dos processos erosivos em trilha: subsídio ao planejamento e manejo**. 2009. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Terra) - UFPR, Curitiba. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Pesquisa%20em%20UCs/resultados%20de%20pesquisa/Ednilson_Feola.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2013.

FERRAZ, S. F. B.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de Sistema de Informações Geográficas (SIG). **Scientia Forestalis**, n. 53, 1998, p. 39-48.

FIORI, A. P. Metodologias de Cartografia Geoambiental. In: PEJON, O.; ZUQUETE, L.V. (Eds.). **Cartografia Geotécnica e Geoambiental: conhecimento do meio físico: base para a sustentabilidade**. São Carlos: Suprema Gráfica Editora, 2004, p. 297.

FONSECA NETO, J. C. 2007. **Ecoturismo no litoral do Paraná: caminhos e descaminhos**. 2007. 210 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <[http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/24778/FONSECA%20NETO,%20J.C.%20\(2007\)%20Ecoturismo%20no%20Litoral%20do%20Parana%20-%20.pdf?sequence=1](http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/24778/FONSECA%20NETO,%20J.C.%20(2007)%20Ecoturismo%20no%20Litoral%20do%20Parana%20-%20.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 3 abr. 2013.

FONTES, S. B. 2004. **Estudos geoambientais da bacia do rio Pardo, a partir da compartimentação em ottobacias: escala 1:100.000**. 2004. 256 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - EESC/USP, São Carlos.

FURQUIM, M. P. O.; SALLEM FILHO, S. **Ortofotocartas digitais e geoprocessamento em rodovias**. Curitiba: ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S. A, 2002.

GENOVEZ, A. N. 1991. Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do estado de São Paulo. 1991. 225 p. Livre docência (Hidrologia) - UNICAMP.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics**. 12th ed. New Jersey: Pearson/ Prentice Hall, 2008, 931 p.

GOMES, D. M.; COLLARES, E. G. **Levantamento das sub-bacias hidrográficas dos afluentes mineiros do Médio rio Grande**. Passos: FESP/UEMG, 2010a. (Relatório Técnico - Científico - Projeto Grande Minas: União pelas águas).

_____. **Compartimentação territorial das Sub-bacias hidrográficas dos afluentes mineiros do Médio rio Grande em macrounidades ambientais e unidades territoriais básicas - UTBs**. Passos: FESP/UEMG, 2010b. (Relatório Técnico - Científico - Projeto Grande Minas: União pelas águas).

GRACE III, J. M. Sediment movement from forest road systems. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 9, 2002, p. 13-14.

GRAHAM, R.; READ, R. E. **Manual of Aerial Photography**. London: Focal Press, 1986, 346 p.

GUMÓS, A. K. **Modelling the Cross-Country Trafficability with Geographical Information Systems**. 2005. 123 p. PhD Thesis (Department of Computer and Information Science) - Linköpings universitet. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:20348/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2013.
HAMMITT, W.; COLE, D. **Wildland Recreation: Ecology And Management**. 2nd edition. New York: John Wiley, 1998, 361 p.

HOSE T. A. Selling the Story of Britain's Stone. **Environmental Interpretation**, v.2, n.10, p 16-17, 1995.

_____. 3G's for Modern Geotourism. **Geoheritage**, v. 4, n. 1-2, p. 7-24, 2012a.

_____. European geotourism—geological interpretation and geoconservation promotion for tourists. In: BARRETINO, D.; WIMBLEDON, WAP; GALLEGÓ, E. (Eds.). **Geological heritage: its conservation and management**. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de Espana, 2000, p 127-146.

HUTCHINSON, M. F.; GALLANT, J. C. Digital elevation models and representation of terrain shape. In: Wilson, J. P.; Gallant, J. C. (Eds.). **Terrain analysis: Principles and applications**. New York: John Wiley Sons, 2000, p. 29-50.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável. **Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra da Canastra**. Ministério do Meio Ambiente: Brasília - DF, 2005, 828 p.

_____. 2013. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/revista/apresentacao.htm>>. Acesso em: 18 jan 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2013. **Atlas Escolar**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 16 jan 2013.

_____. 2006. **Censo agropecuário**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

_____. 2010. **Censo Demográfico**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=>>>. Acesso em: 16 jan. 2014.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p.131-152

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2013. **Classificação de Imagens**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>>. Acesso em: 26 jun 2013.

_____. 2014. **Monitoramento de queimadas e incêndios**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/>>. Acesso em: 4 jan. 2014.

INTERNATIONAL ECOTOURISM SOCIETY. 2013. **The International Society Ecotourism**. Disponível em: <<http://www.ecotourism.org/>>. Acesso em: 4 fev 2013.

JAISWAL, R.; MUKHERJEE, S.; RAJU, K.; SAXENA, R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, n. 1, 2002, p. 1-10.

JONES J. A.; GRANT G.E. Peak flow responses to clearcutting and roads in small and large basins, Western Cascades, Oregon. **Water Resources Research**, v. 32, n. 4, 1996, p. 959-974.

JONES, J. A.; SWANSON, F. J.; WEMPLE, B. C.; SNYDER, K.U. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. **Conservation Biology**, v. 14, nº. 1, 2000, p. 76-85.

JORGE, F. N. T.; UEHARA, K. Águas Superficiais. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p. 101-109.

KABASHIMA, Y. Fatores de degradação ambiental elementos construtivos na avaliação e monitoramento de escadas no percurso de trilhas no Parque Estadual Turístico de Alta Ribeira. 2011. p. 127. Dissertação (Mestrado Recursos Florestais)- ESALQ/USP, Piracicaba.

KOMOO, I; PATZAK, M. Global Geoparks Network: An Integrated Approach For Heritage Conservation And Sustainable Use. In: LEMAN, M. S.; REEDMAN, A.; PEI, C. S. (Eds). **Geoheritage of East and Southest Asia**. Malaysia: Institut Alam Sekitardan Pembangunan (LESTARI), 2008, p. 1-13.

KROEFF, L. K.; SILVA, T. M. Relações entre uso, degradação e variáveis hidrogeomorfológicas nas trilhas ecoturísticas do Parque Nacional Serra dos Órgãos. **Revista de Geografia**, volume especial, 2010. p. 259-276.

KUMAR, M. Digital Image Processing. In: SIVAKUMAR, M.V.K.; ROY, P.S.; HARMSSEN, K; SAHA, S.K. **Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology**. Geneva: World Meteorological Organization, 2004, p. 81-102.

L. SANTOS; J. C. L. D'ALGE. Confecção de mapa de trafegabilidade do terreno usando SIG e imagens de satélite. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1990, Manaus. **Anais**. v. 3, p. 763-765. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte@80/2008/08.19.18.07/doc/763-765.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2013.

LEAL, M.; RAMOS, C. Susceptibilidade às cheias na área metropolitana de Lisboa norte: factores de predisposição e impactes das mudanças de uso do solo. **Finisterra**, v. XLVIII, n. 95, 2013, p. 17-40.

LEITE, S. S. **Análise ambiental da área do morro do Cuzuzeiro (Analândia, SP), como subsídio ao planejamento do ambiental local**. 2002. p. 161. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Recursos Naturais) - UFSCar, São Carlos.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006, 908 p.

LUCE, C. H.; WEMPLE, B. C. Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic effects of forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, n. 2, 2001, p. 111-113.

MACIEL, C. B. **Análises geotécnicas e hidrossedimentológicas de estradas não pavimentadas: estudo de caso da fazenda Cerro Azul - planalto norte catarinense**.

2010, p. 144. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura e Gerência viária) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MacLAREN, F.T. The International Year of Ecotourism in review. **Journal of Sustainable Tourism**, v. 5, n. 10, p. 443-448, 2002.

MAGRI, R. A. F. **Análise da suscetibilidade à erosão da região do Médio Rio Grande (MG)**. 2013. 226 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - EESC/USP, São Carlos.

MEDEIROS, J. S.; CÂMARA, G. Geoprocessamento para projetos ambientais. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001, p 10/1 - 10/36. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 15 jul. 2012.

MEDEIROS, M. B.; FIEDLER, N. C. Incêndios florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: desafios para a conservação da biodiversidade. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, 2004, p. 157-168.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **Manual de Abreviaturas, Siglas, Símbolos e Convenções Cartográficas das Forças Armadas - MD33-M-02**. ed. 3ª. 2008. 334 p. Brasília - DF.

MINISTÉRIO DO TURISMO. **Anuário Estatístico de Turismo**. Volume 40. Ano base 2012. Disponível em: http://www.dadosefatos.turismo.gov.br/export/sites/default/dadosefatos/anuario/downloads_anuario/Anuario_Estatistico_de_Turismo_-_2013_-_Ano_base_2012_-_Versao_dez.pdf. Acesso em: 25 abr. 2014.

MINISTÉRIO DO TURISMO. **Panorama do Turismo Internacional - 2012**. Disponível em: http://www.dadosefatos.turismo.gov.br/export/sites/default/dadosefatos/estatisticas_indicadores/downloads_estatisticas_indicadores_turismo_mundo_2012.pdf. Acesso em: 25 abr. 2014.

MINISTÉRIO DO TURISMO. **Panorama do Turismo Mundial**. Disponível em: http://www.dadosefatos.turismo.gov.br/dadosefatos/estatisticas_indicadores/estatisticas_indicadores_turismo_mundial/. 2009. Acesso em: novembro de 2011.

MOAWAD, B. M. **Applications of remote sensing and geographic information systems in geomorphological studies: Safaga-El Quseir area, Red Sea, Egypt as an example**. 2008. 282 p. PhD Thesis - Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Cairo - Egito.

MORISAWA, M. E. Quantitative Geomorfology of Some Watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of American Bulletin**, v. 73, 1962, p. 1025 - 1046.

NASCIMENTO, M. A. L.; RUCHKYS, U. A.; MANTESSO NETO, V. **Geodiversidade, Geoconservação e Geoturismo: Trinômio importante para a proteção do patrimônio geológico**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2008, 82 p.

NASCIMENTO, M. A. L.; RUCHKYS, U. A.; MANTESSO NETO, V. Geoturismo: Um novo segmento do turismo no Brasil. **Global Tourism**, v. 3, n. 2, 2007.

NASCIMENTO, M. A. L.; SCHOBENHAUS, C.; MEDINA, A. I. M. Patrimônio geológico: Turismo sustentável. In: SILVA, C.R. (Eds). **Geodiversidade do Brasil: Conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, p. 148-162.

NEWSOME D.; DOWLING R.K. Setting agenda for geotourism. In: NEWSOME D.; DOWLING R.K. (Eds). **Geotourism: the tourism of geology and landscape**. Oxford: Goodfellow Publishers, 2010, 246 p.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G. O.; SILVEIRA, A. C.; WATERLOO, M. J.; SALESKA, S. R. Height Above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, 2011, p.13-20.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004, 308 p.

OCCHIPINTI, A.G. & SANTOS, P.M. Relações entre as precipitações máximas de “um dia” e de “24 horas” na cidade de São Paulo. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico/ USP, 1966, 26p.

OLIVE, N. D.; MARION, J. L. Olive The influence of use-related, environmental, and managerial factors on soil loss from recreational trails. **Journal of Environmental Management**, 90, 2009, p. 1483 - 1493.

OLIVEIRA, D. S. **Zoneamento de risco de incêndios em povoados florestais no norte de Santa Catarina**. 2002. p. 113. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/25217/D%20-%20OLIVEIRA,%20DANIELLE%20DOS%20SANTOS%20DE.pdf?sequence=1>. Acesso em: 6 jan. 2014.

OLIVEIRA, D. S.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; GRODZKI, L.; VOSGERAU, J. Zoneamento de risco de incêndios florestais para o estado do Paraná. **Floresta**, v. 34, n. 2, 2004, p. 217 - 221.

OLIVEIRA, I. C. S. **O uso da análise espacial no processo de integração terreno, condições meteorológicas e inimigo (PITCI) do Exército Brasileiro.** 2006. p. 94. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/2435>>. Acesso em: 17 dez. 2013.

OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; BARBOSA, F. O. A.; ROMÃOS, P. A.; CARVALHO, D. F. Estimativa das equações de chuvas intensas para algumas localidades no estado de Goiás pelo método da desagregação de chuvas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 30, n. 1, 2000, p.23-27.

OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; WEHR, T. R.; BORGES, L. B.; SARMENTO, P. H. L.; GRIEBELER, N. P. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 30, n. 1, 2005, p.13-18.

ORAMS, M.B. Types of Ecotourism. In: WEAVER, D.B. (Ed.). **The Encyclopedia of Ecotourism.** Wallingford, UK: CABI Publishing, 2001, p. 23-36.

OSARAGI, T. **Classification methods for spatial data representation.** Centre for Advanced Spatial Analysis: Working Paper Series, 40, 2002, 19 p.

PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. Mapeamento geotécnico regional na escala 1:100.000-considerações metodológicas. **Revista Instituto Geológico**, volume Especial, 1995, p. 23-29.

PEZZOPANE, J; E. M. OLIVEIRA NETTO, S. N. VILELA, M. F. Risco de incêndios em função da caracterização do clima, relevo e cobertura do solo. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, 2001, p. 161-165.

PIRANHA, J. M.; DEL LAMA, E. A.; BACCI, D.C. Geoparks in Brazil - strategy of Geoconservation and Development. **Geoheritage**, v. 3, n. 4, 2011, p. 289-298.

PRANDINI, F. L.; GUIDICINI, G.; GREHS, S. A. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995, p. 187-202.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Diretrizes de projeto para estudos hidrológicos método de "I-Pai-Wu"**. In: Diretrizes de projetos de hidráulica em drenagem. Secretaria de Vias públicas, 1999, p. 106-120. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%20%C3%89CNICAS%20INSTRU%C3%87%C3%95ES%20NOVAS/Hidr%C3%A1ulica%20e%20drenagem%20Urbana/DH-H06.pdf>. Acesso: 27 mar 2014.

PRUDENTE, T., D. **Geotecnologias aplicadas ao mapeamento de risco de incêndio florestal no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e área de entorno.** 2010. 114.

Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Disponível em:

http://www.ig.ufu.br/sites/ig.ufu.br/files/Anexos/Bookpage/tatiana_prudente.pdf.

Acesso em: 20 jul. 2013.

RENNÓ, C.D., A.D. NOBRE, L.A CUARTAS, J.V. SOARES, M.G. HODNETT, J. TOMASELLA AND M.J. WATERLOO. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, 2008, p. 3469-81.

RETZLAF, J. G. **Análise de processos erosivos em parques estaduais de Campos Gerais - PR**. 2008, p. 111. Dissertação (Mestrado em Geografia, Meio Ambiente e Desenvolvimento) - UEL, Londrina. Disponível em: <

<http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?code=vtls000129088>> Acesso em: 5 mar. 2012.

RODRIGUES, G. O.; NOBRE, A. D.; SILVEIRA, A. C.; CUARTAS, L. A. **Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) - estudo de caso em Manaus/AM**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. Anais eletrônicos do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba: INPE, 2011. Disponível em: <
<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1379.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2014.

RODRIGUES, V. L. **Mapeamento geotécnico como base para o planejamento urbano e ambiental: município de Jaú/SP**. 2008, p. 154. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - EESC/USP, São Carlos. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-23042008-094825/pt-br.php>. Acesso em: 3 dez. 2012.

ROMSHOO, S. A.; BHAT, S. A.; RASHID, I. Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus Basin. **Earth System Science**, v. 121, n. 3, 202, p. 659-686.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. Tradução e revisão técnica Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Makron Books, 1991, 326 p.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. Oficina de Textos: São Paulo, 2008, 496 p.

SANTOS, A. R.; LOUZADA, F. L. R. O.; EUGENIO, F. C. **ArcGIS 9.3 TOTAL: Aplicações para dados espaciais**. 2ª ed. Alegre - ES, 2010, p. 184.

SCHOBENHAUS, C. **Projeto Geoparques: proposta de projeto**. Serviço Geológico do Brasil: Brasília, p. 9, 2006 (mapa anexo).

SCHREIER, H.; LAVKULICH, L. M. A Numerical Approach to Terrain Analysis for Off - Road Trafficability. **Photogrammetric engineering and Remote Sensing**, v. 45, n. 5, 1979, p. 635-642.

SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, L. M. T. 2014. **Inventário Florestal de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/inventarioFlorestal/>>. Acesso em: 13 mar. 2014.

SETZER, A. W.; SISMANOGLU, R. A. **Risco de Fogo: Metodologia do Cálculo - Descrição sucinta da Versão 9**. 2012. Disponível em: <http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/documentos/RiscoFogo_Sucinto.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2014.

SHERIDAN, L.M.; HALPENNY, E. Conference report: the world Ecotourism Summit. **Journal of Sustainable Tourism**, v. 5, n. 10, p. 449-453, 2002.

SHOOP; S.; AFFLECK; R.; COLLINS; C.; LARSEN; G.; BARNA; L.; SULLIVAN; P. Maneuver analysis methodology to predict vehicle impacts on training lands. **Journal of Terramechanics**, v. 42, 2005, p. 281-303.

SILVA, C. R.; DANTAS, M. E. 2010. Mapas Geoambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 7, 2010, Maringá. **Anais 7º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental**. Maringá: ABGE, 2010. 1 CD-ROM.

SILVA, F. R. **A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: potencial para o uso turístico da sua geologia e geomorfologia**. 2007. p. 144. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVA, S. F. **Zoneamento geoambiental com auxílio de lógica fuzzy e proposta de um geoindicador para caracterização do meio físico da bacia do rio do Peixe**. 2005. 394 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - EESC/USP, São Carlos.

SIMÕES, L. S. A.; ZANARDO, A.; LEITE JUNIOR, W. B.; MORALES, N.; SILVA, C. H.; SANTOS, T. E. S. S.; POYAY, W. R. H.; SILVA, A. J. C. A.; VALERIANO, C. M. 2008. **Geologia e recursos minerais da folha de Delfinópolis (MG)**. Escala 1:100.000. UNESP/CPRM.

SINGH, J. Ecotourism. New Delhi: I.K. International Publishing House, 2010, p. 221.
Slocum, K. R. Trafficability Analysis Engine. **CROSSTALK: The Journal of Defense Software Engineering**, 2003, p. 28-30. Disponível em: <http://www.crosstalkonline.org/storage/issue-archives/2003/200306/200306-Slocum.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2013.

SNYDER, S. A.; WHITMORE, J. H.; SCHNEIDER, I. E.; BECKER, D. R. Ecological criteria, participant preferences and location models: A GIS approach toward ATV trail planning. **Applied Geography**, v. 28, n. 4, 2008, p.248-258.

SOARES, M. Impactos do Turismo: Os Efeitos do Ecoturismo em Unidades de Conservação. **Revista Científica do Curso de Turismo do IFES**, v.2, n. 2, 2007.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, n. 32, 1976, p. 71-104.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope stability: recognition, analysis and zonation. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. **Landslides investigation and mitigation**. Washington: Transportation Research Board, National Research Council - Spetial Report, 1996, p. 129-177.

SOUSA, G. M. **Mapeamento geoecológico da potencialidade à ocorrência de incêndios no maciço da Pedra Branca/RJ**. 2009. 124 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - UFRJ, Rio de Janeiro.

SOUZA, C. R. G. Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 6, n. 1, 2005, p. 45 - 61.

SULSOFT. 2013. **Guia ENVI em português**. ITT Visual Information Solutions. Disponível em: <<http://www.sulsoft.com.br>>. Acesso em: 16 jan 2013.

Sustainable Tourism, v. 5, n. 10, p. 443-448, 2002.

TEKNOMO, K.; 2006. **Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial**. Disponível em: <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/index.html>. Acesso em: 28 mar 2014.

TOMCZYK, A.M.; EWERTOWSKI, M. Planning of recreational trails in protected areas: application of regression tree analysis and geographic information systems. **Applied Geography**, v. 40, 2013, p.339-351.

TOMMASELLI, A. M. G. **Apostila Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente: Edição do Autor, 2012. Disponível em: <http://www4.fct.unesp.br/docentes/cartotomaseli/Fotogrametria_1/arquivos_pdf_2009/FOTO5_6_2009.pdf>. Acesso em: 15 jan 2013.

TUCCI, C. E. M. Controle de enchentes. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009a, p. 621-658.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009b, p. 621-658.

VIEIRA, D. B.; LOMBARDI NETO, F. L.; SANTOS, R. P. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuva em Mococa-SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 8, 1998, p. 1215-1220.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245 p.

WU, I Pai; DELLER, J. W.; DISKIN, M.H. **Determinantion of peak discharge and design hydrographs for small watersheds in Indiana**. Joint Highway Research Project. Purque University Lafayette Indiana, nº 7, 1964, 124 p.

XIANG, W. A GIS based method dor trail alignment planning. **Lanscape and Urban Planning**, v. 35,1996, p. 11-23.

XU, D.; DAÍ, L.; SHAO, G.; TANG, L.; WANG, H. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. **Journal of Forestry Research**, v. 16, n. 3, 2005, p. 169-174.

YOUSSEF, A. M.; PRAHNAM, B.; GABER, A. F. D.; BUCHROITHNER, M. F. Geomorphological hazard analysis along the Egyptian Red Sea coast between Safaga and Quseir. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, n. 3, 2009, p. 751-766.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: Ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP)**. 2000. p. 149. Tese (Doutorado em Geociências) - UNESP, Rio Claro. Disponível em: <<http://acervodigital.unesp.br/handle/123456789/48545>>. Acesso em: 7 mar. 2012.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica**. São Paulo: Oficina de Texto, 2004, p. 190.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. 1987. p. 673. Tese (doutorado em Geotecnia) - EESC/USP, São Carlos.

_____. **Mapeamento geotécnico: Ribeirão Preto**. Relatório Científico FAPESP, v. 2, 1991, p. 269.

_____. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. 1993. p. 256. Tese (Livre Docência) - EESC/USP, São Carlos.

APÊNDICE A - Mapa de Documentação

APÊNDICE B - Carta de declividade

APÊNDICE C - Mapa de cobertura do solo referente a 2009.

APÊNDICE D - Cartas de trafegabilidade (Período seco e úmido)

APÊNDICE E - Mapa de compartimentação da área de estudo em bacias hidrográficas

APÊNDICE F - Carta de suscetibilidade à inundação de planícies.

APÊNDICE G - Parâmetros utilizados no cálculo da vazão de cheia

Cachoeiras	A (km²)	Tc (min)	Coeficiente de escoamento superficial (C)																		
			Ic	C ₁	Cob. 1	A ₁	C ₂	Cob. 2	A ₂	C ₂	Cob. 3	A ₃	C ₂	Cob. 4	A ₄	C ₂	Co. 5	A ₅	C ₂	C ₂ pond.	C
Barulho	1,67	11,61	0,60	1,54	campo	1,53	0,30	campo arb.	0,13	0,20	Mineração	0,01	0,10							0,29	0,24
Bateia	41,41	112,48	0,34	1,71	campo	24,29	0,30	mata	4,82	0,10	culturas	1,18	0,30	pastagem	10,93	0,30				0,28	0,24
Capivara do Fumal	43,21	81,82	0,60	1,54	campo	30,99	0,30	mata	5,07	0,20	culturas	4,94	0,30	pastagem	1,44	0,30	campo arb.	0,73	0,20	0,29	0,23
Capivara	6,55	35,87	0,55	1,57	campo	5,89	0,30	mata	0,64	0,20				pastagem	0,01	0,30				0,29	0,24
Carapuça	8,14	42,52	0,49	1,61	campo	8,14	0,25	mata	0,13	0,10										0,25	0,21
Esmeril	0,25	5,70	0,64	1,51	campo	0,23	0,30	mata	0,02	0,10										0,29	0,23
Ezio	3,08	26,40	0,67	1,50	campo	3,03	0,30	mata	0,05	0,10										0,30	0,24
Falcão	3,75	20,40	0,65	1,51	campo	3,54	0,30	mata	0,20	0,10										0,29	0,23
Garrida	7,91	42,00	0,50	1,60	campo	7,79	0,25	mata	0,13	0,10										0,25	0,21
Grinalda	35,53	61,94	0,62	1,53	campo	23,60	0,20	mata	5,16	0,20	culturas	4,94	0,30	pastagem	1,44	0,30	campo arb.	0,35	0,20	0,22	0,176
Lobo	2,83	21,23	0,79	1,43	campo	2,83	0,30													0,30	0,23
Lobo Guará	0,93	10,24	0,79	1,43	campo	0,93	0,30													0,30	0,23
Oratório	6,83	39,73	0,55	1,57	campo	6,18	0,30	mata	0,64	0,20				pastagem	0,01	0,30				0,29	0,24
Paraíso 1	9,28	38,51	0,72	1,47	campo	8,83	0,30	mata	0,45	0,20										0,30	0,23
Paraíso 2	15,16	48,43	0,73	1,46	campo	14,70	0,30	mata	0,45	0,20										0,30	0,23
Paraíso dos Pássaros	0,49	7,53	0,76	1,45	campo	0,46	0,30	mata	0,03	0,10										0,35	0,28
Paraíso Perdido	25,69	54,55	0,54	1,57	campo	23,28	0,25	mata	1,66	0,10	mineração	0,55	0,10	pastagem	0,04	0,30	camp arb.	0,16	0,20	0,24	0,20
Paraíso Proibido	18,84	40,38	0,63	1,52	campo	17,18	0,25	mata	1,15	0,10	mineração	0,32	0,10	pastagem	0,04	0,30	camp arb.	0,14	0,20	0,24	0,19
Paraíso Selvagem 1	4,16	25,53	0,35	1,70	campo	3,49	0,30	mata	0,59	0,10							camp arb.	0,08	0,20	0,27	0,23
Paraíso Selvagem 2	3,87	19,95	0,67	1,50	campo	3,49	0,30	mata	0,38	0,10										0,28	0,22
Quilombo	176,61	164,78	0,38	1,68	campo	126,56	0,20	mata	20,16	0,10	culturas	13,66	0,30	pastagem	15,68	0,30	camp arb.	0,45	0,20	0,21	0,18
Rasga Saco	198,28	193,96	0,44	1,64	campo	139,85	0,25	mata	26,37	0,10	culturas	13,97	0,30	pastagem	17,01	0,30	camp arb.	0,95	0,20	0,24	0,20
Remanso	185,65	177,33	0,41	1,66	campo	130,79	0,25	mata	23,48	0,10	culturas	13,97	0,30	pastagem	16,47	0,30	camp arb.	0,82	0,20	0,24	0,20
Taboão	16,26	35,66	0,52	1,59	campo	15,33	0,25	mata	0,85	0,10							camp arb.	0,06	0,20	0,24	0,20
Taquara	35,19	60,48	0,63	1,52	campo	23,28	0,20	mata	5,13	0,20	culturas	4,94	0,30	pastagem	1,44	0,30	camp arb.	0,35	0,20	0,22	0,176
Vitória	3,01	25,86	0,43	1,65	campo	2,85	0,30	mata	0,14	0,10	culturas	0,02	0,30							0,29	0,25

Cachoeiras	I chuva crítica (mm/h)							K	Vazão de cheia (m³/s)		
	k	a	b	c	5 anos	10 anos	50 anos		5 anos	10 anos	50 anos
Barulho	876,011	0,147	11	0,751	106,77	118,24	149,86	1,00	11,11	12,30	15,59
Bateia	863,388	0,162	11	0,751	30,12	33,70	43,76	0,94	53,74	60,13	78,07
Capivara do Fumal	872,172	0,149	11	0,751	36,90	40,92	52,00	0,92	65,07	72,14	91,69
Capivara	874,664	0,150	11	0,751	61,97	68,78	87,63	0,98	21,75	24,14	30,75
Carapuça	880,053	0,146	11	0,751	56,03	61,99	78,39	0,98	21,20	23,45	29,66
Esmeril	866,905	0,145	11	0,751	132,16	146,15	184,60	1,00	2,42	2,68	3,38
Ezio	853,072	0,169	11	0,751	73,75	82,91	108,80	1,00	13,35	15,01	19,69
Falcão	879,474	0,150	11	0,751	84,19	93,44	119,05	0,99	17,64	19,58	24,94
Garrida	880,088	0,146	11	0,751	56,45	62,46	78,99	0,98	20,40	22,57	28,54
Grinalda	873,725	0,149	11	0,751	44,32	49,16	62,50	0,92	49,58	54,98	69,91
Lobo	854,115	0,168	11	0,751	82,47	92,65	121,42	1,00	13,64	15,33	20,09
Lobo Guará	880,376	0,150	11	0,751	112,97	125,35	159,62	1,00	6,90	7,66	9,75
Oratório	874,737	0,150	11	0,751	58,39	64,81	82,56	1,00	21,84	24,24	30,88
Paraíso 1	857,554	0,165	11	0,751	59,72	66,98	87,40	0,98	28,31	31,75	41,43
Paraíso 2	857,959	0,165	11	0,751	52,06	58,37	76,12	0,97	37,96	42,56	55,50
Paraíso dos Pássaros	889,173	0,150	11	0,751	126,38	140,22	178,48	1,00	5,09	5,64	7,18
Paraíso Perdido	851,868	0,152	11	0,751	47,00	52,20	66,62	0,94	44,52	49,45	63,11
Paraíso Proibido	855,206	0,151	11	0,751	56,61	62,86	80,17	0,94	39,79	44,19	56,35
Paraíso Selvagem 1	871,642	0,155	11	0,751	75,07	83,60	107,36	0,99	17,52	19,51	25,06
Paraíso Selvagem 2	872,229	0,153	11	0,751	84,82	94,34	120,78	0,99	17,72	19,71	25,23
Quilombo	889,357	0,154	11	0,751	23,48	26,13	33,48	0,86	104,56	116,34	149,05
Rasga Saco	888,929	0,153	11	0,751	20,89	23,24	29,74	0,87	118,92	132,26	169,28
Remanso	889,195	0,154	11	0,751	22,28	24,79	31,74	0,85	118,38	131,69	168,64
Taboão	872,862	0,164	11	0,751	63,44	71,09	92,60	0,94	40,77	45,68	59,50
Taquara	873,748	0,149	11	0,751	45,01	49,91	63,47	0,92	49,63	55,04	69,99
Vitória	866,164	0,146	11	0,751	73,02	80,83	102,31	1,00	13,48	14,91	18,88

APÊNDICE H - Cartas de suscetibilidade à ocorrência de incêndios

**APÊNDICE I - Chaves de codificação das bacias hidrográficas em relação às suas
susceptibilidade e restrições**

APÊNDICE J - Carta de potencialidades e restrições ao uso turístico