

ROSSANA XAVIER

**ALTERNATIVAS PARA O TRAÇADO DO HIPERANEL
RODOVIÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO
HORIZONTE (MG), UTILIZANDO ROTINAS DE APOIO À DECISAO
EM SIG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL**

2002

ROSSANA XAVIER

**ALTERNATIVAS PARA O TRAÇADO DO HIPERANEL
RODOVIÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO
HORIZONTE (MG), UTILIZANDO ROTINAS DE APOIO À DECISÃO
EM SIG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2002.

Profa. Izabel Christina D’Almeida
Duarte de Azevedo

Prof. Newton Moreira de Souza

Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho
(Conselheiro)

Prof. Dario Cardoso de Lima
(Conselheiro)

Profa. Maria Lúcia Calijuri
(Orientadora)

À minha mãe Arlete Nogueira Xavier
Ao meu pai Sebastião Flor Xavier
Às minhas irmãs Andréa, Márcia e Renata
Ao meu afilhado Edílson Jesus dos Santos Júnior
Ao meu namorado João de Paiva Lopes Júnior

AGRADECIMENTO

A Deus, pela vida.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de participar do Programa de Pós-graduação – Mestrado em Engenharia Civil – área de concentração Geotecnia.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudo.

À Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belo Horizonte – SUREG/BH, na pessoa do Dr. Claiton Piva Pinto, gerente de Recursos Minerais, e na pessoa do Dr. Nelson Baptista de O. R. Costa, gerente de Relações Institucionais e Desenvolvimento, pela disponibilização de dados em formato digital e analógico.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais – DER/MG, na pessoa do Engenheiro Sérgio Penido de Oliveira, chefe do Serviço de Geoprocessamento, também pela disponibilização de dados em formato digital e analógico.

Ao Geólogo Edézio Teixeira de Carvalho, pela atenção, incentivo e disposição em auxiliar o desenvolvimento deste trabalho, cujas informações e esclarecimentos foram fundamentais para a realização do mesmo.

Aos meus pais Arlete Nogueira Xavier e Sebastião Flor Xavier, pela oportunidade que foi oferecida, de me graduar e adquirir o título de Magister Scientiae, um privilégio para uma cidadã brasileira. Apesar da distância e da saudade que muitas vezes feriu o meu coração, agradeço pelo exemplo de vida, baseado na honestidade e no trabalho, que não me deixou abalar pelas dificuldades. Mãe e pai, simplesmente, obrigado por tudo.

Às minhas irmãs Andréa, Renata, e Márcia, pela ajuda, pelo carinho e pelo incentivo nos momentos mais difíceis de minha vida, e também, pelos momentos de descontração passados juntas.

À minha sobrinha Ana Paula, pelo carinho e atenção.

Ao meu sobrinho e afilhado Edílson Jesus dos Santos Júnior, minha razão de viver.

Ao meu namorado e futuro marido, João de Paiva Lopes Júnior, pelo incentivo, carinho, dedicação e principalmente pelo amor.

À professora Maria Lúcia Calijuri, orientadora e amiga, por muito acreditar em mim e ter-me oferecido a oportunidade de trabalhar com uma pessoa fantástica, uma mestra excepcional, e um ser humano incrível. Por todas as palavras de carinho e incentivo, pela amizade em todos os momentos. A você Professora Lúcia, meu mais sincero obrigado.

Ao professor Carlos Alexandre Braz de Carvalho, pela atenção, pelas discussões sempre tão esclarecedoras, e pela confiança.

Ao professor Dario Cardoso de Lima pelos aconselhamentos.

A professora Izabel Christina D’Almeida Duarte de Azevedo pelo carinho.

À secretaria da pós-graduação Cristina, pelo competente trabalho que desempenha todos os dias, mas principalmente pela amizade nos momentos tristes e felizes.

Aos integrantes do Núcleo Sigeo, especialmente Anderson Meira, Eduardo Bhering, Ligiane de Souza e Juliana Lorentz, pelo grande auxílio técnico, pelo companheirismo e pelos momentos de descontração.

À amiga Janaína Pacheco, cuja amizade muito me conforta, apesar da distância que nos separa.

Ao amigo Wellington Guimarães, pela amizade e pela contribuição.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho.

BIOGRAFIA

ROSSANA XAVIER, filha de Sebastião Flor Xavier e Arlete Nogueira Xavier, nasceu em 16 de junho de 1976, na cidade de Lavras (MG).

Em agosto de 1999, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG).

Em fevereiro de 2000, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG).

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Organização da dissertação.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. Estradas.....	6
2.1.1. A estrada como auxiliar ao tráfego.....	6
2.1.2. Rodoviarismo federal.....	8
2.1.3. Malha rodoviária.....	10
2.1.4. Estado atual de conservação e manutenção das rodovias mineiras.....	11
2.1.5. Planejamento.....	15

2.1.5.1. Elementos de planejamento em estradas.....	15
2.1.5.2. Variável ambiental.....	17
2.1.6. Traçado das estradas.....	18
2.1.7. Alguns aspectos de interesse para a construção de estradas	19
2.1.7.1. Relevo.....	19
2.1.7.2. Geologia.....	20
2.1.7.3. Solos.....	23
2.1.8. Classificação de solos para estradas.....	23
2.1.8.1. Classificação pedológica.....	24
2.1.8.2. Classificação HRB.....	24
2.1.8.3. Metodologia MCT.....	25
2.1.9. Classificação das rodovias.....	29
2.1.9.1. Classificação funcional.....	29
2.1.9.2. Critérios básicos da classificação técnica.....	30
2.1.9.3. Classes de projeto.....	30
2.1.10. Comparação de alternativas.....	31
2.2. Estratégia de decisão.....	33
2.2.1. Introdução.....	33
2.2.2. Algumas definições.....	33
2.2.3. Regra de decisão.....	34
2.2.4. Análise multicritério.....	34
2.2.5. Equipe multidisciplinar.....	35
2.3. Lógica fuzzy.....	35
2.3.1. Histórico.....	36
2.3.2. Generalidades.....	37
2.3.3. Conjuntos fuzzy.....	38
2.4. Geoprocessamento.....	39
2.5. Sensoriamento remoto.....	39
2.5.1. Processamento de imagens digitais.....	40
2.5.1.1. Pré-processamento de imagens digitais.....	40
2.5.1.2. Realce de imagens digitais.....	44

2.5.1.3. Classificação de imagens digitais.....	45
2.5.2. Sistema de informação geográfica.....	47
2.5.2.1. Amostragem do mundo real.....	48
2.5.2.2. Representação de dados de mapas.....	49
2.6. Análise multicritério em ambiente SIG.....	51
2.6.1. Análise booleana.....	51
2.6.2. Análise em termos de adequabilidade.....	53
2.6.2.1. Padronização dos critérios.....	53
2.6.2.2. Pesos dos fatores.....	56
2.6.2.3. Agregação de critérios.....	58
a. Combinação linear ponderada.....	58
b. Média ponderada ordenada.....	60
2.6.3. Estrutura do modelo de análise multicritério.....	62
3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	64
3.1. Localização e divisões administrativas.....	64
3.2. Aspectos fisiográficos.....	65
3.2.1. Relevo.....	65
3.2.2. Geologia.....	66
3.2.3. Hidrografia.....	67
3.2.4. Pedologia.....	68
3.2.5. Clima.....	70
3.3. Aspectos de uso e ocupação do solo	71
3.3.1. Cobertura vegetal.....	71
3.3.2. Núcleos urbanos.....	72
3.3.3. Aeroporto de Confins.....	72
3.3.4. Estradas de rodagem.....	76
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	90

4.1. Descrição dos materiais.....	90
4.1.1. Informações analógicas e digitais.....	90
4.1.2. Equipamentos.....	92
4.1.3. Programas.....	92
4.2. Métodos.....	93
4.2.1. Coleta de dados.....	93
4.2.2. Conversão digital das informações.....	94
4.2.3. Tratamento e análise da imagem orbital.....	95
4.2.3.1. Correção geométrica.....	95
4.2.3.2. Imagem composta.....	96
4.2.3.3. Classificação da imagem orbital.....	97
4.2.4. Análises espaciais.....	99
4.2.4.1. Fatores.....	101
4.2.4.2. Restrições.....	102
4.2.4.3. Cenários de avaliação.....	104
4.2.4.4. Descrição dos fatores considerados.....	105
a. Fatores técnicos – F1.....	105
a.1. Classes de declividades do terreno – F11.....	105
a.2. Tipos de formações geológicas (embasamento) – F12.....	106
a.3. Distância de estruturas geológicas (instabilidade) – F13.....	109
a.4. Estimativa da classificação HRB para os tipos de solos (subleito) – F14.....	111
b. Fator sócio-econômico – F2.....	112
c. Fatores operacionais – F3.....	114
c.1. Distância dos limites municipais de Belo Horizonte – F31.....	114
c.2. Distância das rodovias – F32.....	116
c.3. Distância do aeroporto de Confins – F33....	118
d. Fator ambiental – F4.....	119

4.2.4.5. Descrição das restrições consideradas.....	121
a. Restrição sócio-econômica – R2.....	121
b. Restrição operacional – R3.....	121
c. Restrição ambiental – R4.....	121
4.2.4.6. Agregação dos fatores do 2º. nível.....	121
a. Agregação dos fatores técnicos.....	123
b. Agregação dos fatores operacionais.....	127
4.2.4.7. Agregação dos fatores do 1º. nível.....	128
4.2.5. Cenários finais.....	133
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	138
5.1. A primeira proposta para o Hiperanel.....	138
5.2. Alternativas de traçado para o Hiperanel.....	138
5.2.1. Descrição das alternativas.....	139
a. Hiperanel 1 – HA1.....	139
b. Hiperanel 2 – HA2.....	140
c. Hiperanel 3 – HA3.....	140
d. Hiperanel 4 – HA4.....	141
5.3. Comparação entre as alternativas.....	148
5.4. Faixa de domínio.....	151
6. RESUMO E CONCLUSÕES.....	153
7. RECOMENDAÇÕES.....	156
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	158

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 – Principais rochas sedimentares.....	21
Quadro 2 – Classificação HRB.....	26
Quadro 3 – Propriedades de engenharia dos solos sob o ponto de vista de rodovias.....	29
Quadro 4 – Classes de projeto e critérios de classificação técnica.....	31
Quadro 5 – Municípios e suas respectivas populações residentes.....	73
Quadro 6 – N ^o . de amostras de treinamento das classes informacionais.	98
Quadro 7 – Fatores e respectivos códigos e descrições.....	102
Quadro 8 – Restrições e respectivos códigos e descrições.....	103
Quadro 9 – Fatores e restrições por níveis.....	103
Quadro 10 – Unidades geológicas e descrição dos respectivos tipos de rochas.....	107
Quadro 11 – Agrupamento das unidades geológicas e classificação de seus possíveis comportamentos como embasamento.....	108
Quadro 12 – Importâncias relativas entre os fatores técnicos.....	123

Quadro 13 – Importâncias relativas entre os fatores operacionais.....	127
Quadro 14 – Importâncias relativas entre os fatores.....	131
Quadro 15 – Resumo dos cenários finais propostos.....	134
Quadro 16 – Resumo das características das alternativas de traçado para o Hiperanel da RMBH.....	150
Quadro 17 – Resumo dos custos quando da implantação das alternativas de traçado propostas para o Hiperanel da RMBH.....	151

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Rodovia BR-040, saída para Sete Lagoas em Belo Horizonte.....	12
Figura 2 – Rodovia BR-040, saída para Sete Lagoas em Belo Horizonte.....	13
Figura 3 – Ábaco de utilização para classificação MCT.....	28
Figura 4 – Interpolação espacial.....	43
Figura 5 – Interpolação de intensidade.....	44
Figura 6 – Imagem numérica e imagem classificada.....	45
Figura 7 – Etapas básicas na classificação supervisionada.....	46
Figura 8 – Amostragem e representação de dados reais em SIG.....	49
Figura 9 – Feições cartográficas (pontos, linhas e áreas) representadas pelos formatos: vetorial (vector) e matricial (raster).....	50
Figura 10 – Função sigmoideal e suas variantes.....	54
Figura 11 – Função J-shaped e suas variantes.....	54
Figura 12 – Função linear e suas variantes.....	55

Figura 13 –	Funções definidas pelo usuário.....	56
Figura 14 –	Tela de entrada das importâncias relativas entre os fatores no módulo WEGHT do programa Idrisi 32.....	57
Figura 15 –	Tela de entrada dos fatores e restrições no módulo MCE_WLC do programa Idrisi 32.....	59
Figura 16 –	Tela de entrada dos fatores e restrições no módulo MCE_OWA do programa Idrisi 32.....	60
Figura 17 –	Espaço Estratégico de Decisão.....	61
Figura 18 –	Estrutura de análise por nível e grupo de critérios.....	63
Figura 19 –	Localização da área de estudo no Estado de Minas Gerais.....	65
Figura 20 –	Localização da Região Metropolitana de Belo Horizonte na área de estudo.....	78
Figura 21 –	Divisões administrativas.....	79
Figura 22 –	Modelo digital do terreno (MDT).....	80
Figura 23 –	Carta de declividades.....	81
Figura 24 –	Carta de classes de declividades.....	82
Figura 25 –	Formações geológicas.....	83
Figura 26 –	Estruturas geológicas.....	84
Figura 27 –	Hidrografia (cursos d'água).....	85
Figura 28 –	Pedologia.....	86
Figura 29 –	Imagem orbital (composição das bandas 3, 4 e 5).....	87
Figura 30 –	Localização do Aeroporto de Confins e rodovias pavimentadas e não pavimentadas.....	88
Figura 31 –	Mapa rodoviário.....	89
Figura 32 –	Imagem temática resultante da classificação supervisionada.....	100
Figura 33 –	Fluxograma do processo de agregação de fatores e restrições.....	104
Figura 34 –	Gráfico representativo da padronização do fator distância das estruturas geológicas.....	110

Figura 35 –	Fatores técnicos (F11, F12, F13 e F14).....	113
Figura 36 –	Fator sócio-econômico (F2).....	115
Figura 37 –	Gráfico representativo da padronização do fator distância dos limites municipais de Belo Horizonte.....	116
Figura 38 –	Gráfico representativo da padronização do fator distância das rodovias.....	117
Figura 39 –	Gráfico representativo da padronização do fator distância do Aeroporto de Confins.....	119
Figura 40 –	Fatores operacionais (F31, F32 e F33).....	120
Figura 41 –	Fator ambiental (F4).....	122
Figura 42 –	Resultado final da análise multicritério WLC utilizada para a agregação dos fatores técnicos (F1).....	126
Figura 43 –	Resultado final da análise multicritério WLC utilizada para a agregação dos fatores operacionais (F3).....	129
Figura 44 –	Comparação entre os pesos ordenados para cenários finais C1, C2, C3 e C4.....	134
Figura 45 –	Pontos de decisão para os cenários finais C1, C2, C3 e C4.....	135
Figura 46 –	Cenários finais C1, C2, C3 e C4.....	136
Figura 47 –	Alternativas de traçado HA1, HA2, HA3 e HA4, nos respectivos cenários finais C1, C2, C3 e C4.....	142
Figura 48 –	Alternativas de traçado para o Hiperanel da RMBH, apresentando Aeroporto de Confins, rodovias e principais rios.....	143
Figura 49 –	Alternativa de traçado HA1 e ligações existentes.....	144
Figura 50 –	Alternativa de traçado HA2 e ligações existentes.....	145
Figura 51 –	Alternativa de traçado HA3 e ligações existentes.....	146
Figura 52 –	Alternativa de traçado HA4 e ligações existentes.....	147

EXTRATO

XAVIER, Rossana, M. S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2002.
**ALTERNATIVAS PARA O TRAÇADO DO HIPERANEL
RODOVIÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO
HORIZONTE (MG), UTILIZANDO ROTINAS DE APOIO À
DECISAO EM SIG.** Orientadora: Maria Lúcia Calijuri. Conselheiros:
Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Dario Cardoso de Lima.

O município de Belo Horizonte viveu intensamente o processo de urbanização migratório, conseqüente do projeto desenvolvimentista de industrialização do país, deflagrado na década de 50 do século XX, que trouxe consigo o problema do êxodo rural, provocando um “inchaço” populacional. Um dos problemas daquela época era o trânsito, que se complicava cada vez mais, exigindo providências urgentes. Assim, na tentativa de melhoria do trânsito local e regional, o Anel Rodoviário de Belo Horizonte (atual) foi construído no ano de 1957, em pista simples, e duplicado mais tarde, entre os anos de 1976 e 1980. Ele é elemento de ligação de importantes rodovias federais: BR-040, BR-262 e BR-381. Porém, com o adensamento da área urbana, o Anel passou a desempenhar o papel de via urbana, além de sua função original de artéria de transposição da capital mineira. Atualmente, ele

encontra-se saturado, sendo que seu uso como via urbana já consome praticamente sua capacidade operacional. Este trabalho teve por finalidade pesquisar, avaliar e sugerir os melhores traçados para o Hiperanel Rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando como ferramenta computacional um Sistema de Informação Geográfica para auxiliar nas análises relativas aos espaços disponíveis e aqueles viáveis técnico e economicamente. Alguns benefícios provenientes da construção desta rodovia seriam: atenuação do crescimento populacional do município de Belo Horizonte, distribuição de funções metropolitanas com outros municípios beneficiados pelo hiperanel, integração direta de distintas regiões do estado mineiro, estimulação do trânsito de veículos, em direção ao Aeroporto de Confins. Para isso, realizou-se um levantamento das informações existentes e disponíveis, e as respectivas escalas e formatos. Após esta etapa de campo, todos os dados coletados foram verificados no Laboratório de Ensino e Pesquisa da Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – LabSigeo/PPG/EC/UFV. Os mapas em formato analógico foram convertidos para o formato digital em mesa digitalizadora. As informações da área de estudo foram estudadas e consideradas como fatores e/ou restrições nas análises realizadas. Estas análises resultaram do processo de aplicação da regra de decisão envolvendo critérios múltiplos denominada de Análise Multicritério, para a geração dos cenários finais de decisão. As alternativas foram obtidas de quatro cenários finais, considerando as melhores localizações e respeitando as áreas não adequadas. Elas constituirão subsídio importante à tomada de decisão sobre o melhor traçado para o hiperanel rodoviário da RMBH, possibilitando uma escolha futura mais racional, auxiliando no planejamento e ocupação do solo e favorecendo o desenvolvimento regional. Ressalta-se, porém, que a escolha da melhor alternativa dentre as quatro opções depende de informações adicionais que complementam os resultados obtidos.

ABSTRACT

XAVIER, Rossana, M. S., Federal University of Viçosa, February of 2002.
ALTERNATIVES FOR THE PLAN OF ROAD HYPER-RING OF THE METROPOLITAN AREA OF BELO HORIZONTE (MG), USING ROUTINES OF SUPPORT TO THE DECISION IN SIG. Adviser: Maria Lúcia Calijuri. Committee Members: Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Dario Cardoso de Lima.

The municipal district of Belo Horizonte lived the migratory urbanization process intensely, consequent of the developing project of industrialization of the country, deflagrated in the decade of 50 of the century XX, that brought with itself the problem of the rural exodus, provoking a "population swelling". One of the problems of that time was the traffic that got complicated more and more, demanding urgent providences. Like this, in the attempt of improvement of the local and regional traffic, the Road Ring of Belo Horizonte (current) was built in 1957, in simple track, and duplicated later, between 1976 and 1980. It is an element of connection of important federal highways: BR-040, BR-262 and BR-381. However, with the density growth of the urban area, the Ring started to play the part of urban road, besides its original function as artery of transposition of the mining capital of Belo Horizonte. Nowadays, it is saturated, and its use as urban road already consumes practically its operational capacity. This work had for purpose to research, to evaluate and to suggest the best plans for the Road Hyper-ring of the Metropolitan

Area of Belo Horizonte (MG), using as computational tool a System of Geographical Information to aid in the relative analyses to the available spaces and those viable technician and economically. Some benefits from the construction of this highway would be: reduction of the population growth of the municipal district of Belo Horizonte, distribution of metropolitan functions with other municipal districts benefited by the hyper-ring, direct integration of different areas of the mining state, stimulation of the traffic of vehicles, towards the Airport of Confins. For that, it took place a rising of the existent and available information, and the respective scales and formats. After this field stage, all the collected data were verified in the Laboratory of Teaching and Research of the Masters degree of the Department of Civil Engineering of the Federal University of Viçosa - LabSigeo/PPG/EC/UFV. The maps in analogical format were converted for the digital format in digitizing tablet. The information of the study area were studied and considered as factors and/or restrictions in the accomplished analyses. These analyses resulted from the process of application of the rule of decision involving multiple criteria denominated of Multi-Criteria Evaluation (MCE), for the creation of the final sceneries of decision. The alternatives were obtained from four final sceneries, considering the best locations and respecting the no appropriate areas. They will constitute important aid to the decision on the best plan for the road hyper-ring of RMBH, making possible a more rational future choice, aiding in the planning and occupation of the soil and favoring the regional development. It is stood out, however, that the choice of the best alternative among the four options depends on additional information that complement the obtained results.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A expansão dos núcleos centrais dos municípios traz consigo vários problemas. Assim, todo o processo de crescimento urbano rápido, e na maioria das vezes, desordenado, cria e acentua problemas de má integração intra-urbana, de carência de infra-estrutura e de uso inadequado do solo. Como consequência, tem-se o agravamento da situação das rodovias que possuem os traçados cortando ou tangenciando áreas urbanas. É o que ocorreu com a capital mineira. O projeto desenvolvimentista de industrialização do país, deflagrado na década de 50 do século XX, trouxe consigo o problema do êxodo rural, provocando um “inchaço” populacional nas grandes cidades, agravado pela falta de empregos. O município de Belo Horizonte viveu intensamente este processo de urbanização migratório. Em 1950, a cidade tinha pouco mais de 350 mil habitantes e, em 1960, quase 700 mil. Os serviços básicos eram ineficientes e havia poucas perspectivas de melhorias. O abastecimento de água continuava deficitário e o trânsito se complicava, exigindo providências urgentes.

Na tentativa de melhoria do trânsito local e regional, o Anel Rodoviário de Belo Horizonte (atual) foi construído no ano de 1957, em pista simples, e duplicado mais tarde, entre os anos de 1976 e 1980. Ele o é elemento de ligação das seguintes Rodovias Federais:

- BR-040: Brasília / Belo Horizonte / Rio de Janeiro;
- BR-262: Vitória / Belo Horizonte / Uberaba;
- BR-381: Governador Valadares / Belo Horizonte / São Paulo.

Na época da sua construção, o processo de ocupação periférica da cidade ainda não tinha atingido o nível atual.

Com o adensamento da área urbana, e implantação de obras importantes (como por exemplo, o estádio de futebol Mineirão e o Campus da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG), o Anel passou a desempenhar o papel de via urbana, além de sua função original de artéria de transposição da capital mineira.

Atualmente, o Anel Rodoviário de Belo Horizonte, encontra-se saturado, sendo que seu uso como via urbana já consome praticamente sua capacidade operacional. Isto significa elevado custo para o transporte rodoviário regional, provocado pelos sistemáticos congestionamentos verificados nos seus entroncamentos com a BR-381 (Avenida Amazonas), BR-040 (Avenida Vereador Cícero Idelfonso) e MG-424 e MG-010 (Avenida Pedro I/Avenida Antônio Carlos).

Uma das possíveis soluções seria a construção de um Hiperanel Rodoviário, externo ao atual, considerando que parte substancial do tráfego pesado de longa distância não tem Belo Horizonte por destino.

Observa-se um conjunto de benefícios diretos e indiretos como consequência da construção desta rodovia, visto que a importância do transporte rodoviário no desenvolvimento do país é indiscutível considerando a realidade do mesmo, e se reflete em uma demanda crescente de construção de novas rodovias ou de duplicação e manutenção adequada de outras existentes. São eles:

- atenuação do crescimento populacional do município de Belo Horizonte, devido ao fato de promover a interceptação do tráfego de pessoas em direção ao mesmo;
- distribuição de funções metropolitanas com outros municípios beneficiados pelo hiperanel;
- redução de tempo de viagem para todo o tráfego que não demanda Belo Horizonte, aumentando a eficiência da rede rodoviária nacional, que tem nesta cidade seu principal entroncamento (interesse federal);
- integração direta de distintas regiões do estado mineiro, igualmente dependentes desse entroncamento, e indução do desenvolvimento regional (interesse estadual);
- estimulação do trânsito de veículos de todas as regiões do Estado de Minas Gerais e de outros Estados da Federação, em direção ao Aeroporto de Confins, possibilitando aos usuários a utilização de serviços e usufruto de uma infra-estrutura de excelente qualidade.

Nesse sentido, a aplicação dos Sistemas de Informações Geográficas no planejamento do uso e ocupação do solo favorece o desenvolvimento regional, auxilia a preservação do meio ambiente, determina as áreas que necessitam de correções prioritárias, e orienta a ocupação dos espaços disponíveis. O benefício social decorrente do uso dessa tecnologia evidencia-se na boa aplicação dos recursos a áreas públicas ou privadas, melhorando a qualidade de vida da população.

O resultado das análises efetuadas ao final deste trabalho constituirá subsídio importante à tomada de decisão sobre as melhores alternativas de traçado para o Hiperanel Rodoviário da RMBH, possibilitando uma escolha futura mais racional dos pontos de vista técnico, econômico e ambiental. Isso demonstra que rotinas de apoio à decisão, tal como Análise Multicritério, podem ser incorporadas em estudos e anteprojetos de traçados de rodovias ou

outras obras de infra-estrutura, como redes elétricas, oleodutos, gasodutos e outros, sem incorrer necessariamente em custos elevados.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivos pesquisar, avaliar e sugerir os melhores traçados para o Hiperanel Rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando como ferramenta computacional um Sistema de Informação Geográfica para auxiliar nas análises relativas aos espaços disponíveis e aqueles viáveis técnico e economicamente.

1.3. Organização da tese

A organização da tese apresenta-se como segue:

- No capítulo 2, aborda-se uma revisão de literatura, em que se apresentam temas considerados relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, englobando: a estrada (histórico, auxílio ao tráfego, situação da malha rodoviária estadual, planejamento e traçado); o relevo, a geologia e a pedologia como fatores importantes a serem considerados em projetos e anteprojetos de rodovias; classificação das rodovias; estratégia de decisão; geoprocessamento; e análise multicritério.
- No capítulo 3, abordam-se as características da área de estudo, tais como: localização e divisões administrativas; aspectos fisiográficos (relevo, geologia, hidrografia, pedologia e clima); aspectos de uso e ocupação do solo (cobertura vegetal, núcleos urbanos, aeroporto de Confins, estradas de rodagem).
- No capítulo 4, os materiais e os métodos utilizados são apresentados, assim como todo o processo de manipulação dos

dados e geração das imagens referentes aos cenários finais, derivados das análises multicritérios OWA realizadas.

- No capítulo 5, trata-se dos resultados obtidos para as alternativas de traçado do Hiperanel Rodoviário da RMBH, assim como, das discussões pertinentes a elas.
- O capítulo 6 apresenta o resumo e as conclusões relativas a este trabalho. Assim, o mesmo trata das alternativas propostas para o Hiperanel, da metodologia utilizada e da necessidade de um número maior de informações para a realização de melhores interpretações e conseqüentes tomadas de decisão.
- Finalmente, apresentam-se as referências bibliográficas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estradas

2.1.1. A estrada como auxiliar ao tráfego

Na história dos meios de transporte, a estrada ocupa um lugar importante desde milhares de anos atrás. Sua origem remonta a época pré-histórica, inicialmente na forma elementar de caminhos que ligavam uma cabana à outra, um povoado a uma fonte, a um rio ou aos terrenos de caça, e mais tarde às pradarias e terrenos cultivados. As famílias que viviam isoladas começaram a formar aldeias e cidades, e com o agrupamento das tribos e o aparecimento dos Estados, as estradas passaram a ser construídas com disposição em planos mais amplos e melhores concebidos (HENTRICH, 1934).

A história relata a construção de estradas no antigo Egito. No princípio, elas serviam ao transporte de grandes blocos de granito que seriam utilizados na construção das pirâmides de Queóps. Em geral, eram construídas com finalidades militares e se empregavam para o tráfego dos exércitos e para

melhorar as comunicações com os territórios conquistados, o que facilitava o domínio.

Os Fenícios foram os construtores das primeiras estradas realizadas com fins comerciais. Com o crescente desenvolvimento cultural e econômico, foram lentamente construindo verdadeiras redes de estradas. Nos cantos homéricos, citam-se pequenas estradas ou caminhos que ligavam entre si os reinos da antiga Grécia. Mas o grande avanço nesta área, especialmente no aspecto técnico, tem seu lugar no Império Romano. Em todos os territórios que formaram parte do grande Império, encontram-se hoje restos da antiga rede de estradas romanas. As mais antigas datam do século III a.C.

Na Itália, o foco do Império Romano, preservam-se ainda hoje as antigas estradas romanas, tanto por sua extensão, quanto pela perfeição de sua concepção técnica, permitindo apreciar as extraordinárias condições dos romanos para a concepção e construção de estradas. Sob o reinado do imperador Trajano, no século I d.C., o império romano possuía uma rede de estradas de mais de 300.000 km de extensão. Por esta época, os romanos também penetraram nos países germânicos. Com o declínio e separação do Império Romano, estas rotas perderam suas condições de segurança e de conservação, e nunca mais seriam garantidas.

Passaram-se séculos antes que a Alemanha começasse o ressurgimento das estradas de comunicação, de extensão, e de condições técnicas comparáveis. Durante o império de Carlo Magno, dava-se também importância às estradas de transporte. Seguindo este imperador a concepção romana, quis estabelecer seu império sobre uma ampla rede de estradas, que a princípio teve, sobretudo o caráter militar, que ia de castelo a castelo, embora finalmente construídas com caráter comercial, sendo uma das mais importantes rotas desta época, a estrada abaixo de Rhin por Frankfurt, Rothenburg, Ausburg, e Brenner. As correntes comerciais, dirigidas preferencialmente em direção ao Sul, deram lugar, no período dos Hohenstaufen, à outra rota que desde o norte da Alemanha se dirigia em direção à Itália, atravessando os Alpes.

As campanhas napoleônicas imprimiram nova atividade à construção de estradas, assemelhando-se às estradas romanas, tendo também finalidades comuns. Após a queda de Napoleão, continuou em toda a Europa a construção de estradas até o aparecimento da estrada-de-ferro na segunda metade do século XVIII. Esta última teve rápido progresso, fazendo com que a primeira perdesse sua importância inicial, paralisando seu desenvolvimento, para voltar a surgir com o aparecimento dos automóveis.

No período de 1860 a 1897 desenvolveu-se um projeto prático de motor a explosão para veículos rodoviários. No decorrer do século XX, essa modalidade de transporte teve crescimento dos mais significativos (CARVALHO et al., 1993).

A descoberta do primeiro poço de petróleo data de 1859, nos Estados Unidos, por Edwin L. Drake. Em 1909, Henry Ford iniciou a grande arrancada para o transporte rodoviário com a utilização do motor à explosão inventado pelos alemães, Carl Benz e Gottlieb Daimler.

Desta forma, fazia-se necessário planejar e construir estradas de rodagem com técnicas adequadas para proporcionar condições ao tráfego dos veículos automotores.

2.1.2. Rodoviarismo federal

No Brasil, os caminhos de carroças ligavam cidades e vilas brasileiras desde o século XVI. Foi apenas com a inauguração da estrada União Indústria – a primeira estrada de rodagem do país, em 1861, que a história do rodoviarismo nacional começava a ser escrita. Entretanto, mesmo depois da União Indústria e até alguns anos após a criação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER, em 1937, essa história continuava sem ter muito o que dizer (DNER, 2002a).

A implantação de uma estrada permanente entre Minas Gerais e Rio de Janeiro é uma das mais interessantes páginas da História do Brasil colonial.

Apesar da União Indústria ter sido construída no século XIX, Fernão Dias, grande empreendedor, iniciou, em 1674, a expedição que seria o passo inicial para povoamento do território mineiro. Criou então um caminho provisório para os bandeirantes, o que seria o "embrião" da União Indústria. Sete anos mais tarde, o governador do Rio de Janeiro, Artur de Sá Menezes, incumbiu Garcia Rodrigues Paes, filho de Fernão Dias, da construção de um caminho permanente para as minas gerais do Cataguás, já que a viagem pelo caminho antigo levava cerca de 100 dias e, ainda, colocava os viajantes à mercê dos piratas que atuavam na baía de Angra dos Reis. Rodrigues Paes conseguiu diminuir o tempo da viagem para 25 dias. Só que, após seis anos de intensos trabalhos, encontrou-se com a saúde debilitada e com a fortuna esgotada, ambas na dedicação àquele que viria a ser conhecido como o Caminho Novo. Com isso, o encargo foi passado ao cunhado de Rodrigues Paes, Domingos Rodrigues da Fonseca, em 1704. Somente em 1709, contudo, o objetivo foi alcançado e a via possibilitava o trânsito regular de tropeiros. Em 1725, Bernardo Soares Proença traçou uma variante, encurtando a jornada em 4 dias, o que facilitou ainda mais o eixo Rio/Minas, e permitindo maior rapidez no trânsito das inúmeras riquezas extraídas naquela província mineira.

Entretanto, outros problemas surgiram e acabaram tornando-se grandes empecilhos para os deslocamentos dos transeuntes. Os maiores deles eram os salteadores, que ameaçavam e dizimavam grupos inteiros para roubar seus pertences. Até que entra em cena um ilustre personagem: Joaquim da Silva Xavier, o Tiradentes, contribuindo com policiamento intensivo pelo Caminho Novo. Contudo, o traçado e a sua manutenção eram ainda grandes obstáculos a serem superados.

Já no século XIX, entre 1836 e 1838, o fundador de Juiz de Fora, o engenheiro Henrique Guilherme Fernando Halfed, melhorou e ampliou a rota, criando a Estrada Nova do Paraibuna, futura União Indústria.

A origem dessa primeira Estrada de Rodagem do Brasil, maior obra de engenharia na América Latina em seu tempo, deu-se a 7 de agosto de 1852, quando o visionário Mariano Procópio obteve, graças ao decreto do governo

imperial n.º 1.301, a autorização para a construção, melhoramento e conservação de duas linhas de estradas . O empreendimento, considerado por muitos como impossível de ser realizado foi iniciado em 12 de abril de 1856, com a presença e o incentivo de D. Pedro II. A obra exigia, entretanto, um esforço notável para engenheiros e operários, já que a estrada era entrecortada por cursos d'água e pelas escarpas graníticas da serra do Taquaril. Mariano Procópio, então, contratou profissionais alemães. O brasileiro Antônio Maria Bulhões ficou responsável pelo trecho entre Petrópolis e Três Rios, enquanto o alemão Keller assumia a responsabilidade do trecho Três Rios a Juiz de Fora, na época a Cidade do Paraibuna.

Nascia, assim, a rodovia União Indústria, a primeira estrada macadamizada do continente concluída a 23 de julho de 1861 com 144 km de extensão, sendo 96 km no estado do Rio de Janeiro e 48 km em Minas Gerais.

A estrada União Indústria permitiu o desenvolvimento dessas duas regiões, proporcionando infra-estrutura adequada para o escoamento de produtos e mercadorias. Em 1867, contudo, a chegada da estrada de ferro à localidade de Três Rios marcou o início da decadência da União Indústria.

2.1.3. Malha rodoviária

O Brasil é um país com uma das maiores malhas rodoviárias do mundo. Estima-se que existe atualmente no país mais de um milhão e seiscentos mil quilômetros de estradas e que somente 8% dessas rodovias são asfaltadas. Esse percentual é bastante inferior ao de países menos desenvolvidos, aqui mesmo na América Latina e do Continente Africano. A triste estatística é de grande preocupação, uma vez que o transporte rodoviário é responsável direto por mais de 65% do volume de toda a carga transportada em território nacional e 95% do transporte de passageiros; o que corresponde a 70% do PIB brasileiro (REIS & SANTO, 1999).

De acordo com dados do Ministério dos Transportes (2000), o estado de Minas Gerais reserva ao Setor Transportes uma importante função estratégica, devido a uma economia caracterizada pela ampla concentração da indústria de bens intermediários e pela extração mineral, possuindo uma malha rodoviária com 264.898 km, dos quais 11.076 km federais, 14.648 km estaduais e 239.174 km municipais.

A malha rodoviária pavimentada de Minas Gerais é a maior dentre os estados brasileiros, porém a idade dos pavimentos existentes é elevada, sendo que mais de 50% dessa malha apresentam idade superior a 10 anos, numa situação que vem se agravando continuamente.

2.1.4. Estado atual de conservação e manutenção das rodovias mineiras

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais – DER/MG, informa a situação recente das rodovias sob sua responsabilidade e recomenda aos motoristas muita atenção e cautela nas estradas, aconselhando que programem suas viagens antes de iniciá-las (DER/MG, 2002).

Várias rodovias são citadas e suas respectivas condições de conservação e manutenção apresentadas para melhor auxiliar os motoristas que necessitam trafegar por elas.

Um exemplo é a rodovia MG-020, entre Belo Horizonte e Santa Luzia, que se encontra em obras iniciadas em 30 de agosto de 2001. A obra de restauração tem por objetivo melhorar as condições de pontos críticos, recuperar o pavimento e munir o trecho de uma sinalização vertical e horizontal mais adequada. Assim, a circulação de veículos na MG-020 encontra-se mais lenta.

Outro exemplo é a rodovia BR-040, que corta todo o Estado de Minas Gerais na direção NW-SE, ligando os município de Brasília e Rio de Janeiro. Em vários trechos, o pavimento encontra-se em péssimas condições e a pista apresenta vários problemas. Dentre eles, destacam-se (DNER, 2002b):

- Inexistência de acostamento;
- Acostamento com buracos;
- Acostamento ruim com pista em estado regular;
- Pista simples com buracos;
- Sinalização vertical deficiente;
- Erosão lateral ao longo da pista de rolamento;
- Radar inoperante.

As Figuras 1e 2 apresentam fotografias da rodovia BR-040, na saída para Sete Lagoas, próximo a Belo Horizonte. Elas foram enviadas ao CREA/MG pelo engenheiro agrônomo Carlos Alberto Câmara Viana. Os enormes buracos nas marginais desta rodovia reforçam a tese de abandono das rodovias mineiras e o desastre anunciado.



Figura 1– Rodovia BR-040, saída para Sete Lagoas em Belo Horizonte.

Fonte: CREA/MG, 2002.



Figura 2– Rodovia BR-040, saída para Sete Lagoas em Belo Horizonte.

Fonte: CREA/MG, 2002.

Alguns trechos de outras rodovias no Estado de Minas Gerais encontram-se em meia pista, aumentando o risco de acidentes rodoviários. São eles:

- AMG-900 – devido ao rompimento de aterro, no entroncamento com a MG-129, próximo ao município de Itabira, e devido à erosão no corpo do aterro, próximo ao acesso ao município de Cristina (km 1);
- LMG-694 – no entroncamento com a BR-116 (km 5);
- LMG-736 – devido ao rompimento do aterro, no entroncamento com a MGT-120 (km 11);
- MG-030 – entroncamento para Raposos/Rio Acima (km 30,5);
- MG-105 – Pavão/Águas Formosas (km 175);
- MG-108 – também devido a rompimento de aterro, próximo ao município de Lajinha (km 221).

Podem ser encontrados, também, vários trechos de rodovias, ou mesmo rodovias inteiras, com problemas graves de manutenção e conservação, distribuídos em todo o Estado de Minas Gerais. Esta situação tende a aumentar o risco de acidentes, o que vem sendo agravado, no momento, pelas águas das chuvas que caem no estado mineiro.

Como conseqüência da ação das águas das chuvas, vários trechos de outras rodovias encontram-se interrompidos devido a quedas de pontes ou rompimento de aterros de encabeçamento de outras pontes. São eles:

- BR-120 – no entroncamento para o município de Ferros (km 345);
- BR-418 – na divisa dos estados de Minas Gerais e Bahia (km 58);
- MG-406 – na divisa dos municípios de Almenara e Rubim (kms 30 e 35,5);
- MGT-259 – no entroncamento com a BR-116, em Santo Antônio do Porto (km 191,7).

Em decorrência destes fatos, profissionais de engenharia, entidades de classe, instituições de ensino, representantes da sociedade civil organizada, órgãos públicos e empresas, reuniram-se em Belo Horizonte, nos dias 23 e 24 de agosto de 2001, para o I Seminário “Rodovias de Minas”, realizado pelo Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Minas Gerais (CREA/MG), para discussão do abandono em que se encontram as estradas mineiras e sugerir algumas soluções para os problemas existentes (CREA/MG). Assim, todos eles, conscientes de sua responsabilidade técnica e social, manifestaram à sociedade e aos órgãos técnicos especializados, públicos e privados, sua preocupação com o estado de conservação da malha rodoviária estadual e federal e com o risco iminente de um colapso no sistema de transportes, através da elaboração da Carta de Belo Horizonte – Rodovias de Minas.

2.1.5. Planejamento

Entende-se o planejamento “como um processo permanente, constituído por um conjunto integrado de atividades pelo qual se busca transformar uma situação atual, objetivando alcançar uma situação futura considerada desejável” (GEIPOT, 1977: Apud LIMA, 1991).

Segundo LIMA (1991), planejar é uma atividade dinâmica e mutável por excelência, e o planejamento não deve ser concluído com um documento, ele deve ser concebido como processo.

2.1.5.1. Elementos de planejamento em estradas

Segundo OLIVEIRA & BRITO (1998), o estudo e os projetos de rodovias incluem desde rodovias novas, com ou sem estudos anteriores de viabilidade técnico-econômica, até projetos simplificados e casos particulares como rodovias rurais, passando por projetos de pavimentação de rodovias já implantadas, bem como de duplicação, projetos de restauração, com melhoramentos ou não de traçado.

Os estudos comuns aos serviços de implantação de uma nova via, ou melhoria de vias existentes envolvem, entre outras, considerações relativas ao tráfego, perspectivas sócio-econômicas para a região, levantamentos topográficos de superfície, levantamentos geológico-geotécnicos de superfície e subsuperfície, levantamentos hidrológicos e hidrogeológicos (LIMA et al., 1985).

No Brasil, é comum subdividir o estágio de projeto em estudos de inventário, viabilidade, projeto básico e projeto executivo.

Na fase de inventário, procede-se aos estudos de escritório, com eventuais visitas ao campo.

Fonte: GEIPOT – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Rodovias Vicinais (Critérios de Planejamento)**. Brasília-DF. 1977.

Na fase de viabilidade, são definidas as alternativas possíveis para o traçado, a partir dos elementos obtidos na fase anterior, destacando-se os serviços:

- mapeamento geológico-geotécnico de subsuperfície com descrição e caracterização das diferentes formações que possam interessar à obra;
- mapeamento das formações superficiais, com definição das características tecnológicas de interesse para as possíveis zonas de corte e fundação;
- levantamento dos materiais naturais de construção;
- sondagens geofísicas ao longo do eixo da estrada, para determinação da espessura de camadas, profundidade da rocha sã (obras-de-arte), nível d'água, cavidades subterrâneas, servindo de base para a campanha de sondagens rotativas ou a percussão e como guia para os serviços de terraplenagem (escarificabilidade dos materiais);
- sondagens diretas a trado cavadeira, poços, trincheiras, possibilitando o acesso do observador ao local sondado.

Na fase de projeto básico, procede-se ao detalhamento do eixo definitivo. Alguns trabalhos realizados nesta fase são:

- mapeamento geológico-geotécnico de superfície e subsuperfície, em uma faixa de interesse para a obra;
- levantamento de regime hidrológico e hidrogeológico, compreendendo o histórico pluviométrico por trechos e o estudo do comportamento do lençol freático nas camadas de interesse para a obra;
- caracterização geotécnica dos materiais de fundação (subleito) e de jazidas para empréstimo;

- estudos específicos para greides positivos (pontes, aterros) e para greide negativo (túneis).

Na fase de projeto executivo, existem os trabalhos de campo desenvolvidos durante a execução da obra, tais como orientação de terraplenagem (materiais de 1º, 2º e 3º categorias), estudos específicos para muros de arrimos, cortinas de tirantes protendidos, etc.

2.1.5.2. Variável ambiental

A partir da promulgação, em 23/01/1986, da Resolução nº. 001 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, a construção e a operação de obras de engenharia capazes de causar significativas modificações no meio ambiente devem ser precedidas da elaboração do Estudo de Impacto Ambiental – EIA e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA (GALVES & HACHICH, 2000).

Entre as atividade modificadoras do meio ambiente, a Resolução do CONAMA cita as estradas de rodagem com duas ou mais faixas de rolamento“ (Artigo 2º, inciso I).

Com a promulgação, em 19/12/1997, da Resolução nº 237 do CONAMA, foram mantidas às exigências legais relacionadas ao licenciamento ambiental para os empreendimentos capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental. Segundo o Anexo I, parte integrante desta Resolução, as obras civis, mais especificamente, as rodovias são consideradas como empreendimentos sujeitos a este tipo de licenciamento.

O Instituto de Pesquisas Rodoviárias e a Associação Brasileira de Normas Técnicas elaboraram duas normas que incorporam a variável ambiental em projetos rodoviários. São definidos os procedimentos a serem adotados na realização de estudos preliminares, na elaboração do anteprojeto e do projeto definitivo com vistas à preservação ambiental. As normas são: “Estudos e Projetos para a Integração de Rodovias com o Meio Ambiente”, e

“Norma Rodoviária de Integração de Rodovias com o Meio Ambiente na Região Amazônica”, registradas no DNER sob a codificação PRO-212/88 e PRO-211/88, respectivamente (LIMA, 1991).

2.1.6. Traçado das estradas

Na década de 30, século XX, a construção de estradas deixou de ser uma arte para se constituir em uma ciência. Distinguiu-se fundamentalmente entre o traçado técnico e o traçado econômico (HENTRICH, 1934).

O título de traçado econômico compreendia a investigação de uma linha que reunia dois pontos, de tal modo que os gastos de construção e exploração constituíam um mínimo. Por outro lado, o traçado técnico deveria levar em conta todas as considerações de caráter técnico referentes ao traçado de curvas, inclinações, etc.

As considerações exclusivamente econômicas para o traçado foram perdendo lugar em quase todos os países adiantados da época. O traçado de uma nova estrada não tinha mais por objetivo, em geral, estabelecer comunicações entre dois pontos quaisquer, sendo quase exclusivamente utilizado para completar uma rede de estradas existentes e muito freqüentemente, se não na maioria das vezes, oferecer novas facilidades ao tráfego.

Para o traçado propriamente dito era preciso ter em mente, uma série de importantes considerações que se deduziam das condições do tráfego daquela época. Antes de começar os trabalhos do traçado era preciso dispor dos níveis de superfície da região em que se desenvolveria, os quais existiam em muitos casos ou era preciso levantá-los se não existissem.

Atualmente, são vários os fatores que interferem na ligação de duas ou mais localidades, destacando-se, além das condições técnicas e econômicas da estrada, os interesses sociais da região (CARVALHO et al., 1993).

Dentre os fatores que mais substancialmente interferem na definição do traçado de uma estrada, destacam-se: a topografia da região, as condições geológico-geotécnicas, a hidrologia da região e a presença de benfeitorias ao longo da faixa de domínio.

Segundo PONTES FILHO (1998), regiões topograficamente desfavoráveis geralmente acarretam grandes movimentos de terra, elevando substancialmente os custos de construção. O relevo é o condicionante básico de uma estrada em planta e perfil (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

As condições geológicas e geotécnicas podem inviabilizar determinada diretriz de uma estrada. Na maioria dos casos, são grandes os custos necessários para estabilização de cortes e aterros a serem executados em terrenos desfavoráveis (cortes em rochas, aterros sobre solos moles, etc.).

A hidrologia da região pode também interferir na escolha do traçado de uma estrada, pois os custos das obras de arte e de drenagem, geralmente, são elevados. O mesmo acontece com os custos de desapropriação. Dependendo do número de benfeitorias ao longo da faixa de implantação da estrada, os custos de desapropriação podem inviabilizar o traçado.

2.1.7. Alguns aspectos de interesse para a construção de estradas

2.1.7.1. Relevo

Em sua definição mais simples, o relevo refere-se às saliências e reentrâncias da superfície da Terra que podem ser descritas e caracterizadas em diferentes escalas. Em escala planetária, elas são representadas pelos oceanos e continentes, enquanto que, nas áreas continentais, elas podem ser representadas pelas cadeias de montanhas e pelas grandes planícies fluviais ou, ainda, pelos talwegues e interflúvios. O talwegue corresponde à linha sinuosa no fundo de um vale, pela qual as águas correm e onde se alojam os

canais fluviais. O interflúvio é o espaço entre dois talwegues, e é constituído por duas encostas ou vertentes (OLIVERIA & BRITO, 1998).

A amplitude e a declividade caracterizam as formas de relevo, as quais, em seu arranjo espacial, permitem definir diversos tipos de relevo. Assim, por exemplo, é possível identificar superfícies planas, relevos colinosos, regiões montanhosas, cuja distribuição altimétrica permite caracterizar os principais comportamentos do relevo brasileiro, que são os planaltos, as depressões e as planícies.

Sendo o relevo, o condicionante básico de uma estrada, em planta e perfil, suas características topográficas influenciam o projeto rodoviário tanto nas características técnicas da estrada, quanto no processo construtivo (movimentação de terra). Conseqüentemente, o custo final da obra está diretamente relacionado com as superfícies do relevo.

2.1.7.2. Geologia

O território brasileiro foi palco de múltiplos processos geológicos que deram origem a uma grande variedade de rochas, cuja distribuição geográfica é complexa e determinante na história da ocupação e desenvolvimento do país (OLIVERIA & BRITO, 1998).

As formações geológicas são unidades compostas por diferentes tipos de rochas. Estas, por sua vez, são agregados sólidos naturais, compostos por um ou mais minerais, que constituem parte essencial da crosta, resultantes de um processo geológico determinado, e cujo arranjo depende das condições de temperatura e pressão existentes durante a sua formação. Também podem ser compostas por material sólido não-cristalino (vidro vulcânico) e materiais sólidos orgânicos (carvão). Subdividem-se em três grandes grupos, de acordo com a sua origem (MARQUES, 2000):

- Rochas sedimentares;
- Rochas ígneas; e,

- Rochas metamórficas.

As rochas sedimentares resultam da consolidação de sedimentos, ou seja, partículas minerais provenientes da desagregação e do transporte de rochas pré-existentes, ou da precipitação química, ou, ainda, de ação biogênica. Conforme sua origem, são classificadas em: clásticas ou detríticas, químicas ou bioquímicas, e orgânicas. O Quadro 1 apresenta as principais rochas sedimentares.

Quadro 1 – Principais rochas sedimentares.

Clásticas	Pelíticas	Argilitos, siltitos, folhelhos
	Granulares	Arenitos, conglomerados, brechas
Químicas	Carbonáticas	Calcários, dolomitos, margas
	Evaporíticas (sais)	Gypso, anidrita, halita
	Resultantes da precipitação de sílica amorfa	Sílex, opala, calcedônia, chert
Orgânicas		Carvão betuminosos e sub-betuminoso, antracita, grafita, petróleo

Estas rochas são conhecidas em Geologia de Engenharia como “rochas brandas”, pois, em geral, apresentam baixas resistências mecânicas e, muitas vezes, são friáveis, devido à menor coesão dos minerais constituintes (OLIVERIA & BRITO, 1998).

As rochas ígneas ou magmáticas resultam da solidificação de material rochoso, parcial a totalmente fundido, denominado magma, gerado no interior da crosta terrestre. Conforme seu local de formação, podem ser: plutônicas ou intrusivas (granito, diorito, sienito, peridotito, piroxenito, riolito), e vulcânicas ou extrusivas (andesito, traquito, fonolito, basalto).

Elas são as que apresentam, em geral, melhor comportamento geomecânico, sendo que maiores quantidades de quartzo aumentam a resistência mecânica. Por outro lado, também aumentam sua abrasividade, levando a um maior desgaste de equipamentos.

As rochas metamórficas são derivadas de outras pré-existentes que, no decorrer dos processos geológicos, sofreram mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, no estado sólido, em resposta a alterações das condições físicas (temperatura e pressão) e químicas, impostas em profundidades abaixo das zonas superficiais de alteração e cimentação, ou seja, no domínio das transformações diagenéticas.

Diferenças na presença ou não de fluidos, no tempo de duração do aquecimento e na existência de pressões elevadas produzem rochas distintas: rochas metamórficas grosseiras (gnaisses, xistos grosseiros, quartzitos, anfíbolitos, mármore, migmatitos) ou rochas metamórficas finas (esteatitos, serpentinitos, xistos, filitos, ardósias).

Para estas rochas, o comportamento geomecânico depende da composição original, das condições de temperatura e de pressão e dos fluidos envolvidos no processo metamórfico. Em geral, as rochas grosseiras apresentam melhor comportamento geomecânico do que as finas.

Segundo MARQUES (2000), no que se refere às estruturas geológicas, elas podem ser: sedimentares primárias e estruturas tectônicas. Existindo ainda, as juntas de alívio e a chamada junta-falha.

Segundo OLIVERIA & BRITO (1998), em geral, na prática, um maciço rochoso íntegro e homogêneo raramente é encontrado e a principal preocupação, quase sempre, recai sobre as feições geológicas que representam ou induzem zonas de fraqueza mecânica e vias de percolação no interior das massas rochosas. Tais feições são geralmente as descontinuidades físicas (fraturas – juntas e falhas).

Outras estruturas, porém, podem representar ou induzir zonas de fraqueza nos maciços rochosos, como as dobras, foliações e lineações,

interferindo sobremaneira nos projetos de obras civis (rodovias, mineração, túneis, barragens, etc.).

2.1.7.3. Solos

Segundo OLIVERIA & BRITO (1998), os solos, dependendo dos objetivos e enfoques científicos, têm sido interpretados de maneira diversa: produto do intemperismo físico e químico das rochas (Geologia); material escavável, que perde sua resistência quando em contato com água (Engenharia Civil); camada superficial de terra arável, possuidora de vida microbiana (Agronomia).

2.1.8. Classificação de solos para estradas

As rodovias exibem particularidades construtivas e de solicitação que as diferem das outras obras civis. Apresentam um grande desenvolvimento longitudinal, e logo um número excessivo de amostras a serem examinadas, e as cargas aplicadas são de curta duração e pequena magnitude, interessando camadas pouco profundas (LIMA et al., 1985).

A evolução da indústria automobilística e as necessidades de mercado impuseram aumentos na frota e nas cargas por roda dos veículos em tráfego, incorrendo em melhorias nos padrões construtivos.

Uma forma racional que os engenheiros encontraram para a análise dos materiais do pavimento e do subleito das rodovias foi a utilização de alguns índices gerais que agrupassem os solos em conjuntos com propriedades semelhantes e permitissem, através de uma nomenclatura padronizada, uma rápida identificação de suas características de resistência e compressibilidade.

2.1.8.1. Classificação pedológica

Segundo LIMA et al. (1985), nesta classificação os solos resultantes de idênticos processos, originados de mesma rocha matriz, ou não, às vezes, são agrupados juntos, admitindo-se para eles uma semelhança em suas propriedades mecânicas e hidráulicas, entre outras.

As informações de interesse geotécnico, obtidas de levantamento de solos, devem ser consideradas como uma estimativa e não devem ser aceitas como conclusivas para o desenvolvimento dos projetos geotécnicos. Porém, em sua generalidade, oferecem boas perspectivas de emprego na fase de anteprojeto das obras geotécnicas (LIMA et al., 1996).

De fato, observa-se que existe um distanciamento entre pedólogos e geotécnicos, levando a uma dificuldade de assimilação dos resultados obtidos pelos dois segmentos.

LIMA et al. (1996) consideram que este distanciamento está associado a aspectos de formação básica do engenheiro civil e à sua dedicação na busca do aperfeiçoamento profissional em áreas de interface com outros ramos técnicos, em especial, com a Ciência do solo.

Nos meios rodoviários brasileiros existe controvérsia a respeito do emprego da Classificação Pedológica para fins rodoviários. Parece-nos, contudo, que a possibilidade de tradução dos resultados dos estudos pedológicos em mapas e relatórios explicativos destes, pode transformar este sistema em um elemento de grande interesse para as fases de Inventário e Viabilidade, e mesmo Projeto Básico dos projetos rodoviários (LIMA et al., 1985).

2.1.8.2. Classificação HRB

A classificação de solos do *Highway Research Board* – HRB, adotada pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* –

AASHTO, baseia-se em ensaios normais de caracterização de solos, ou seja, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o ensaio de granulometria. Neste último, têm interesse as porcentagens que passam nas peneiras n^{os} 10, 40 e 200. (SENÇO, 1999).

Este sistema é o mais conhecido e utilizado para a classificação de solos com finalidades rodoviárias.

Os solos são divididos em materiais granulares e materiais siltosos e argilosos, de acordo com a quantidade de material passante na peneira de n^o 200, seja esta menor ou maior do que 35%, respectivamente. Pode-se classificar o comportamento geral do solo como subleito para a construção de estradas, e também, aferir sobre predominância dos tipos de materiais, como por exemplo, pedregulho, areia, silte e argila.

O processo de classificação HRB é realizado utilizando os dados de laboratório, e iniciando a classificação da esquerda para a direita, por eliminação, no Quadro 2 apresentado a seguir. O primeiro grupo que satisfizer os requisitos será o grupo procurado.

2.1.8.3. Metodologia MCT

As classificações tradicionais de solos, desenvolvidas com experiências de solos de regiões temperadas, quando utilizadas em regiões tropicais, muitas vezes não conseguem avaliar adequadamente o comportamento geotécnico dos solos. Assim, é comum que solos tropicais de previsão de comportamento inadequado para fins de engenharia se mostrem, na prática, altamente eficientes (AZEVEDO, 1999).

A partir desta constatação, NOGAMI & VILIBOR (1995) lançaram uma publicação que sintetiza o trabalho desenvolvido por eles na área de classificação e tecnologia rodoviária de solos tropicais.

O sistema de classificação de solos MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) foi desenvolvido inicialmente para aproveitar os solos ditos

Quadro 2 – Classificação HRB.

Classificação geral	Materiais granulares (p) (35% ou menos passando na peneira n.º. 200)							Materiais siltosos e argilosos (p) (mais de 35% passando na peneira n.º. 200)			
	A- 1		A-3	A- 2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Peneiração: % que passa N.º. 10 N.º. 40 N.º. 200	50máx 30máx 15máx	50máx 25máx	51mín 10máx	35máx	35máx	35máx	35máx	36mín	36mín	36mín	36mín
Características da fração que passa n.º. 40: Limite de Liquidez-LL- (%) Índice de Plasticidade- IP-(%)				40máx 10máx	41mín 10máx	40máx 11mín	41mín 11mín	40máx 10máx	41mín 10máx	40máx 11mín	41mín 11mín
Índice de Grupo (IG)	0		0	0		4máx		8máx	12máx	16máx	20máx
Materiais que predominam	Pedra pedreg	britada e areia	Areia fina	Areia e areia ou siltosa argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: LIMA et al., 1985.

“arenosos finos” em bases de pavimentos, considerados inapropriados para emprego em estradas pelas classificações e especificações tradicionais. Nessa metodologia, efetuam-se ensaios mecânicos e hidráulicos simplificados, mais diretamente correlacionáveis com o comportamento dos solos tropicais. Têm como base corpos-de-prova em miniatura, com aparelhagem também reduzida designada de mini-MCV, adaptada do procedimento de compactação desenvolvido por PARSONS (1976), designado MCV.

A classificação geotécnica MCT é obtida mediante o uso do ábaco da Figura 3, agrupando os solos tropicais de acordo com o seu comportamento no estado compactado, em duas classes principais:

- Solos de comportamento laterítico (L); e,
- Solos de comportamento não-laterítico (N).

Os solos de comportamento laterítico são subdivididos em três subgrupos: areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA') e solos argilosos lateríticos (LG').

Os solos de comportamento não-laterítico são subdivididos em quatro subgrupos: areias não-lateríticas (NA), solos arenosos não-lateríticos (NA'), solos siltosos não-lateríticos (NS') e solos argilosos não-lateríticos (NG').

As propriedades geotécnicas em função de cada grupo são apresentadas no Quadro 3, considerando o comportamento mecânico dos solos em obras viárias. Os solos são classificados através de dois índices:

- c' – obtido do ensaio mini-MCV. Traduz o caráter argiloso do solo em análise e está relacionado à sua distribuição granulométrica. Este valor é determinado pela inclinação da reta tangente às curvas de deformabilidade e que passa no ponto de afundamento igual a 2 mm e $\text{mini-MCV} = 10$.
- e' – calculado pela equação $e' = (\text{Pi}/100 + 20/d')^{1/3}$ (Equação 1). Expressa o caráter laterítico do solo. A raiz cúbica foi adotada com o objetivo de igualar a área ocupada pelos solos de comportamento

laterítico à dos solos de comportamento não-laterítico. O índice d' relaciona-se com o entrosamento entre os grãos do solo, propriedade apresentada pelos solos bem graduados e solos lateríticos. Este valor é calculado a partir do coeficiente angular da parte mais inclinada do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes, em que $d' = 1000 * (\Delta D_{as}/\Delta H)$ (Equação 2), onde ΔD_{as} é a diferença de densidade aparente seca relativa a uma variação de teor de umidade ΔH . O valor da perda de massa por imersão P_i (expressa em porcentagem), para cada teor de umidade é determinado pela expressão: $P_i = (M_d/M_s) * f * 100$ (Equação 3), em que M_d é a massa seca eventualmente desprendida (g), M_s é a massa seca da parte extrudada do corpo-de-prova (g), e f é o fator que assume o valor 0,5 quando há desprendimento de blocos cilíndricos coesos e o valor unitário para o restante dos casos.

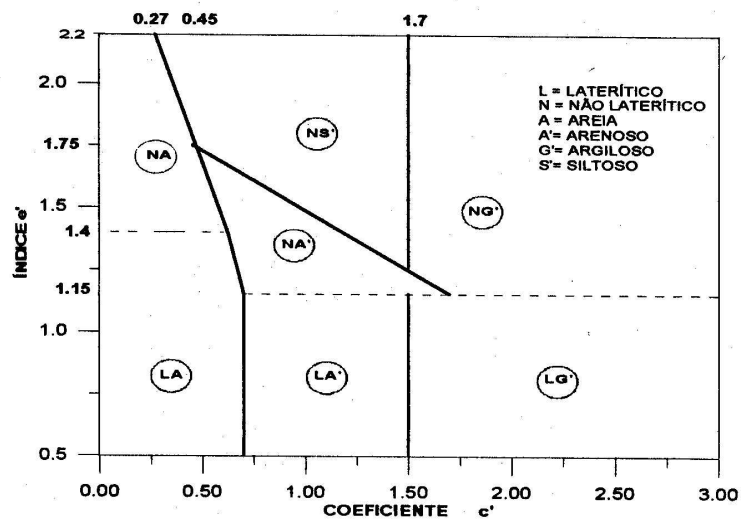


Figura 3 – Ábaco de utilização para classificação MCT.

Fonte: AZEVEDO, 1999.

COMPORTAMENTO			N = NÃO LATERÍTICO				L = LATERÍTICO		
GRUPO	MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI CBR	Sem imersão	M, E	E	M, E	E	E	E, EE	E
		Com imersão	M, E	M, E	B, M	E	E	E	E
	EXPANSÃO		B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO		B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF. PERMEABILIDADE (K)		M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
COEF. SORÇÃO (S)		E	B, M	E	M, E	B	B	B	
Utilização (ordem de preferência) NR: Não reco- mendado	Base de Pavimento		NR	4. ⁰	NR	NR	2. ⁰	1. ⁰	3. ⁰
	Reforço do Subleito		4. ⁰	5. ⁰	NR	NR	2. ⁰	1. ⁰	3. ⁰
	Subleito Compactado		4. ⁰	5. ⁰	7. ⁰	6. ⁰	2. ⁰	1. ⁰	3. ⁰
	Aterro Compactado (corpo)		4. ⁰	5. ⁰	6. ⁰	7. ⁰	2. ⁰	1. ⁰	3. ⁰
	Proteção à erosão		NR	3. ⁰	NR	NR	NR	2. ⁰	1. ⁰
	Revestimento Primário		5. ⁰	3. ⁰	NR	NR	4. ⁰	1. ⁰	2. ⁰
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima próxima da energia normal		Mini- CBR (%) sobrecarga padrão	Expansão (%) Contração (%)		Coef. sorção (S) log (cm/V min)		Coef. de permeabilidade (K) log (cm/s)		
B = baixo (a)		<4	< 0,5		< (-2)		< (-6)		
M = médio (a)		4 a 12	0,5 a 3		(-2) a (-1)		(-6) a (-3)		
E = elevado (a)		12 a 30	> 3		> (-1)		> (-3)		

Quadro 3 – Propriedades de engenharia dos solos sob o ponto de vista de rodovias. Fonte: AZEVEDO, 1999.

2.1.7. Classificação das rodovias

Segundo DNER (1999), a classificação de rodovias por diferentes critérios tem-se revelado necessária para atender a enfoques e objetivos diversos de natureza técnica, administrativa e de interesse dos usuários das vias em geral.

2.1.9.1. Classificação funcional

Tanto a classificação técnica como a administrativa, guardam estreita correlação com a classificação dita funcional, que procura agrupar as rodovias pelo caráter dos serviços que elas prestam. Estes serviços são: hierarquia funcional, relação funcional, acessibilidade e mobilidade, áreas urbanas e rurais, sistemas funcionais.

2.1.9.2. Critérios básicos da classificação técnica

Os trechos integrantes da rede nacional são agrupados, para fins de projeto, em cinco classes de rodovias, numeradas de 0 a IV, correspondendo os menores números a características técnicas mais exigentes (DNER, 1999).

Os principais critérios usados para definir a Classe de um trecho de rodovia são:

- Posição hierárquica dentro da classificação funcional;
- Volume médio diário de tráfego;
- Nível de serviço;
- Outros condicionantes.

2.1.9.3. Classes de projeto

O Quadro 4 apresenta um resumo das classes de projeto, suas respectivas características e critérios de classificação técnica.

Deve-se considerar que o processo de enquadramento das rodovias nas diversas classes definidas não deve ser realizado de forma absoluta, pois as mesmas foram desenvolvidas com visão essencialmente técnica (DNER, 1999).

A existência de programas específicos, condições especiais de desenvolvimento regional e outros fatores, poderão influenciar decisivamente na classificação estabelecida pelas entidades responsáveis.

Finalmente, há que se considerar também que a classe de uma rodovia pode resultar de decisões que se situam no âmbito mais elevado da política de transportes ou de desenvolvimento nacional.

Quadro 4 – Classes de projeto e critérios de classificação técnica.

Classes de projeto	Características	Critérios de classificação técnica (*)
0	Via Expressa – Controle total de acesso	Decisão administrativa
I-A	Pista dupla – Controle parcial de acesso	Quando os volumes de tráfego previstos ocasionaram níveis de serviço em uma rodovia de pista simples inferiores aos aceitáveis.
I-B	Pista simples	Volume horário de projeto VHP > 200 Volume médio diário VMD > 1.400
II	Pista simples	Volume médio diário VMD 700 – 1.400
III	Pista simples	Volume médio diário VMD 300 – 700
IV-A	Pista simples	Volume médio diário VMD 50 – 200
IV-B	Pista simples	Volume médio diário VMD < 50

Fonte: DNER, 1999. (*) Critérios preliminares.

2.1.10. Comparação de alternativas

Tradicionalmente, na etapa de estudo de alternativas do projeto de uma rodovia, são propostos e analisados alguns traçados, visando estimar o custo global do investimento, bem como o seu desempenho econômico (GALVES & HACHICH, 2000).

Segundo SENÇO (1980), cada alternativa estudada deve permitir a comparação com as demais, sendo certo que, inicialmente, sempre existe uma alternativa preferida, a qual é comparada com as outras.

Na comparação de alternativas, leva-se em conta os dados gerais de cada uma, não só do ponto de vista técnico, como também do econômico, social e ambiental.

Dentre as diversas características técnicas desses projetos, destacam-se:

- Extensão;
- Obras de arte;
- Drenagem;
- Curvas horizontais;
- Tangentes horizontais;
- Curvas verticais;
- Tangentes verticais;
- Curvas verticais côncavas;
- Curvas verticais convexas;

Algumas parcelas podem ser consideradas como uma forma de estimar os custos básicos das alternativas, permitindo, no final, uma apreciação do custo por quilômetro. Este dado pode refletir a maior ou menor qualidade dos serviços. Destacam-se as parcelas:

- Desapropriação;
- Movimentação de terra (corte, aterro);
- Transporte (adotando uma distância média);
- Obras de arte (especiais, correntes);
- Drenagem;
- Obras de consolidação;
- Subtotais;
- Eventuais;
- Administração;
- Totais.

2.2. Estratégia de decisão

2.2.1. Introdução

A teoria de decisão está relacionada com a lógica pela qual alguém chega na escolha entre alternativas. Essas alternativas são diferentes de problema para problema (EASTMAN, 1999).

Segundo LIMA (1991), a mente humana não é consistente como gostaria de se acreditar. Essa dificuldade de racionalização é exatamente a razão de interesse da teoria da decisão. Uma vez que o homem não é automaticamente lógico, um decisor consciente precisa desta teoria para ajudá-lo a determinar a melhor escolha entre várias.

2.2.2. Algumas definições

Decisão: a decisão é uma escolha entre alternativas. As alternativas podem representar caminhos diferentes de ação, hipóteses diferentes sobre o tipo de característica, classificações diferentes, e assim por diante. Este conjunto de alternativas é chamado de “quadro de decisão”.

Critério: um critério é alguma base para uma decisão que pode ser medido e avaliado. Ele é a evidência em que um indivíduo possa ser nomeado para um conjunto de decisão. O critério pode ser de dois tipos: fatores e restrições.

Um fator é um critério que acentua ou diminui a adequabilidade de uma alternativa específica para a atividade considerada. Ele é mais comumente medido em escala contínua.

Uma restrição serve para limitar as alternativas sob as considerações. Em muitos casos, as restrições são expressas na forma de um mapa booleano (lógico), onde as áreas excluídas da consideração são codificadas com o valor

zero (0) e aquelas disponíveis para a consideração são codificadas com o valor um (1).

2.2.3. Regra de decisão

O procedimento pelo qual os critérios são selecionados e combinados para chegar a uma avaliação particular, e pelas quais avaliações são comparadas e influenciadas, é conhecido como uma regra de decisão. Uma regra de decisão pode ser como uma simples aplicação de um limiar para um único critério ou ela pode ser como um complexo envolvimento na comparação de avaliações de vários critérios (EASTMAN, 1999).

As regras de decisão são estruturadas no contexto de um objetivo específico.

2.2.4. Análise multicritério

Segundo EASTMAN (1999), o processo atual de aplicação da regra de decisão é chamado de avaliação. O processo de avaliação envolvendo vários critérios (fatores e restrições) é chamado de Análise Multicritério (*MCE – Multi-Criteria Evaluation*).

Esta metodologia de auxílio à decisão tem o objetivo de fazer aflorar de modo organizado e transparente as preferências de cada grupo envolvido no problema e, com isto, facilitar o processo de ordenação das alternativas consideradas, conduzindo a seleção final (LIMA, 1991).

Com o uso desta técnica, os critérios são analisados individualmente e em seguida, são padronizados para que os mesmos possam ser agregados. Porém, cada critério tem o seu peso de importância, uma vez que eles não possuem, em geral, a mesma relevância. A determinação dos pesos requer

muita responsabilidade por parte do analista, pois sua influência nos resultados da análise é considerável.

A função da análise multicritério é relevar e ordenar alternativas geradas por conflitos, apresentadas por vários especialistas (equipe multidisciplinar) com diferentes experiências, compreensão e percepção do projeto.

2.2.5. Equipe multidisciplinar

A separação do campo do saber em disciplinas específicas é um fenômeno do século XX, quando o volume de conhecimento começou a superar a capacidade de armazenamento do cérebro humano, fazendo surgir a especialização (LIMA, 1991).

Na maioria das vezes, um determinado problema pode ser encarado de maneira diferente em cada disciplina. É desejável analisar e avaliar o problema segundo o maior número possível de pontos de vista. Esta é a razão da equipe multidisciplinar.

Segundo LIMA (1991), no grupo de trabalho reunido para tomar decisões, os membros têm a oportunidade de aprender como reconhecer e adquirir prática do poder de participar de decisões, e esta prática é uma das funções necessárias para a eficiência. A solução (ou as soluções) ganha energia, sensibilidade, aumentando também a efetividade.

2.3. Lógica fuzzy

Fuzziness é um tipo de imprecisão caracterizando classes, que por várias razões não podem ter ou não tem limites nitidamente definidos. É freqüentemente uma simultaneidade de complexidade (BURROUGH & McDONNELL, 2000).

Fuzziness não é um atributo probabilístico, em que o grau do membro de um conjunto está relacionado a um dado estatisticamente definido por uma função probabilística. Mais propriamente é uma admissão de possibilidade que um indivíduo é um membro de um conjunto, ou que uma declaração é verdadeira. A valorização de uma possibilidade pode ser baseada na subjetividade, conhecimento intuitivo (especialista) ou preferências, mas isto também pode estar relacionado às incertezas definidas que tem uma base na teoria da probabilidade. Por exemplo, incerteza na alocação de classe poderia estar relacionada à possibilidade de medir erros de uma determinada magnitude.

2.3.1. Histórico

O conceito de conjunto fuzzy foi introduzido, em 1965, por Lotfi A. Zadeh (Universidade da Califórnia, Berkeley). A ele é atribuído o reconhecimento como grande colaborador do controle moderno. Em meados da década de 60, Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana (0/1) (MAIA, 2001).

Em 1974, o Prof. Mamdani, do Queen Mary College, Universidade de Londres, após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com tipos distintos de controladores, somente conseguiu fazê-lo através da aplicação do raciocínio fuzzy.

Esse sucesso serviu de alavanca para muitas outras aplicações, como em 1980, no controle fuzzy de operação de um forno de cimento.

Outras aplicações vieram em seguida, destacando-se, por exemplo, os controladores fuzzy de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e

químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens.

Estimulados pelo desenvolvimento e pelas enormes possibilidades práticas de aplicações que se apresentaram, os estudos sobre sistemas fuzzy e controle de processos avançaram rapidamente, culminando com a criação em 1984, da Sociedade Internacional de Sistemas fuzzy, constituída, principalmente, por pesquisadores dos países mais avançados tecnologicamente.

O desenvolvimento de técnicas de inteligência artificial (IA) nos últimos anos ocupa cada vez mais posição de destaque em pesquisas na área de controle de processos industriais e, aos poucos, começam a ser implantadas em plantas industriais com enorme sucesso.

Mais de 30% dos artigos até hoje publicados sobre esse tema são de origem japonesa, mas trabalhos em sistemas fuzzy são também um procedimento nos EUA e Europa, entretanto não com o mesmo entusiasmo visto no Japão. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA tem investigado o controle fuzzy para motores de energia eficaz, e a NASA tem estudado controle fuzzy para ancorar suas naves automaticamente no espaço. Simulações mostram que um sistema de controle fuzzy pode reduzir em muito o consumo de combustível.

2.3.2. Generalidades

Segundo AVILA (1982), sendo o processo de gerência e tomada de decisão, por sua própria essência, um processo humanístico, isto é, desenvolvido através da percepção e julgamento de pessoas, sujeito ao erro humano, muitas decisões são tomadas a partir da definição de objetivos, avaliação de restrições ou limitações de projeto e avaliação do possível efeito da decisão tomada, expressos de modo subjetivo, não padronizado ou impreciso.

A lógica fuzzy utiliza variáveis lingüísticas no lugar de variáveis numéricas, permitindo introduzir no processo de tomada de decisão variáveis avaliadas de modo subjetivo.

Variáveis lingüísticas admitem como valores apenas expressões lingüísticas (ou termos primários), como "muito grande", "pouco frio", "mais ou menos jovem", que são representadas por conjuntos fuzzy (MAIA, 2001).

A construção de um sistema de controle fuzzy é baseada na idéia de se incorporar "experiência" ou "conhecimento especialista" de um operador humano para se obter a melhor estratégia de controle. Desse modo, a forma das regras empregadas depende do processo a ser controlado.

2.3.3. Conjuntos fuzzy

Os conjuntos fuzzy constituem uma "ponte" no caminho de aproximar o raciocínio humano ao da lógica executada pela máquina. Tradicionalmente, em um conjunto convencional de limites bruscos, a transição dos membros para não-membros é abrupta e repentina. O grau de associação do conjunto é especificado, por exemplo, por um número '1' para os membros e '0' para os não membros – lógica booleana (MAIA, 2001).

Segundo EASTMAN (1999), os conjuntos fuzzy podem ser considerados como classes sem limites rígidos, isto é, a transição entre membro e não-membro de um local dentro do conjunto é gradual.

A teoria dos conjuntos fuzzy, também chamados de Conjuntos Nebulosos, correspondendo ao termo inglês "fuzzy sets", fornece uma metodologia flexível capaz de considerar simultaneamente, num processo de decisão, informações quantitativas e qualitativas fornecidas pelos diversos grupos de influência interessados no processo (AVILA, 1982).

2.4. Geoprocessamento

É o conjunto de pelo menos quatro categorias de técnicas relacionadas à informação espacial (FATORGIS, 2000):

- Técnicas para coleta de informação espacial (Cartografia, Sensoriamento Remoto, GPS, Topografia Convencional, Fotogrametria, Levantamento de dados alfanuméricos);
- Técnicas de armazenamento de informação espacial (Bancos de Dados – Orientado a Objetos, Relacional, Hierárquico, etc.);
- Técnicas para tratamento e análise de informação espacial, como Modelagem de Dados, Geoestatística, Aritmética Lógica, Funções topológicas, Redes; e,
- Técnicas para o uso integrado de informação espacial, como os sistemas GIS – *Geographic Information Systems*, LIS – *Land Information Systems*, AM/FM – *Automated Mapping/Facilities Management*, CADD – *Computer-Aided Drafting and Design*.

Segundo CALIJURI et al. (1999), o geoprocessamento nada mais é do que o resultado de uma forte interação dessas tecnologias, constituindo-se no grande fator de universalização e compartilhamento de informações que, por sua vez, são a matéria-prima responsável pela qualidade das decisões tomadas pelos administradores.

2.5. Sensoriamento remoto

Segundo NOVO (1992), sensoriamento remoto é a utilização de sensores para aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles. Os sensores são equipamentos capazes de detectar a energia (energia eletromagnética ou radiação eletromagnética)

proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informação.

De todas as fontes de dados usadas em SIG, uma das mais importantes é a fornecida pelo sensoriamento remoto. Com o uso de satélites, existem programas contínuos de aquisição de dados para o mundo inteiro, em intervalos de tempo que vão desde semanas até horas. Também relevante é poder-se contar com imagens no formato digital, que permitem rápida integração dos resultados das análises de sensoriamento remoto em um SIG (CALIJURI et al., 2000b).

2.5.1. Processamento de imagens digitais

O processamento de imagem digital envolve a manipulação e interpretação de imagens digitais com o auxílio de um computador (LILLESAND & KIEFER, 1994).

As técnicas de processamento de imagens digitais podem ser classificadas em três conjuntos (NOVO, 1992):

- Técnicas de pré-processamento (preparação de imagens);
- Técnicas de realce; e,
- Técnicas de classificação.

2.5.1.1. Pré-processamento de imagens digitais

As técnicas de pré-processamento têm por objetivos corrigir os erros existentes nos dados obtidos de satélite (dados brutos) e referenciar estes a um sistema de coordenadas terrestres. Existem duas categorias de correções que precisam ser aplicadas aos dados, antes da análise, são elas:

- Correção radiométrica; e,

- Correção geométrica.

A correção radiométrica tem por finalidade corrigir variações nas intensidades dos *pixels* (valores numéricos ou tons de cinza), causadas normalmente pelo mal-funcionamento dos detectores e por efeitos atmosféricos.

A correção geométrica tem por finalidade corrigir uma série de distorções espaciais a que estão sujeitas as imagens geradas por sensores remotos, tais como fotos aéreas e imagens de satélite, não possuindo, portanto, precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos nelas representados.

As distorções espaciais são geralmente classificadas em distorções sistemáticas (previsíveis) e não sistemáticas (aleatórias).

Segundo SOARES (2000), a correção das distorções sistemáticas é baseada nas características dos satélites, do sensor e efemérides, sendo efetuada, geralmente, nas fitas-mestre antes da gravação das fitas para a distribuição aos usuários. As principais causas destas distorções são: mudança na velocidade da plataforma, mudança na velocidade do espelho de varredura, efeito da curvatura terrestre, rotação da Terra e mudança na altitude da plataforma.

O processo de correção das distorções não sistemáticas envolve duas etapas: interpolação espacial e interpolação de intensidade. Estas distorções são causadas pela alteração na atitude do satélite. Atitude refere-se ao posicionamento do satélite com relação aos eixos x (horizontal) e y (vertical) no espaço. A sua correção envolve o uso de pontos de controle terrestres (PCTs). Um ponto de controle (PCT) é um ponto na superfície da Terra, onde as coordenadas da imagem (medidas em linhas e colunas) e as coordenadas de um mapa (UTM, Lat/Long) podem ser identificadas.

Segundo SOARES (2000), no processo de interpolação espacial, a relação geométrica entre a localização do *pixel* da imagem e a correspondente localização do mesmo ponto no mapa precisa ser identificada. Desta forma, a posição de cada *pixel* na imagem original pode ser realocada para sua correta

posição na imagem retificada (Figura 4), mediante análise de regressão dos mínimos quadrados para determinação dos coeficientes das duas equações de transformação que inter-relacionam as coordenadas da imagem e as coordenadas geográficas (mapas). As equações polinomiais utilizadas podem ser do 1º. grau (linear), 2º. grau (quadrática) e 3º. grau (cúbica), apresentadas nas Equações 4 a 9:

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y \quad (4)$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y \quad (5)$$

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (6)$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (7)$$

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^3 + a_9y^3 \quad (8)$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + b_8x^3 + b_9y^3 \quad (9)$$

Sendo que:

x e y representam posições na imagem retificada;

x' e y' representam posições correspondentes na imagem original;

a_i e b_i são os coeficientes de transformação.

É importante verificar as eficiências dos coeficientes de transformação das equações polinomiais antes de aplicá-los para a correção de toda a cena. O método mais frequentemente utilizado envolve a computação da raiz erro médio quadrático (RMSe) para cada ponto de controle terrestre a partir da Equação 10:

$$RMSe = \sqrt{(x - x_{orig})^2 + (y - y_{orig})^2} \quad (10)$$

Onde:

x_{orig} e y_{orig} são as coordenadas da imagem original;

x e y são as coordenadas estimadas pela equação.

A raiz quadrada dos desvios quadrados (RMSe) representa uma medida de exatidão do ponto de controle na imagem. Pela computação do erro médio quadrático para todos os pontos de controle é possível verificar qual ponto de controle exibe o maior erro e somar todos os erros médios quadráticos (RMS total). Quando o RMS total aceitável é alcançado - geralmente erros de 0,5 *pixel* (15 metros) e 1,0 *pixel* (30 metros) para imagens Landsat TM5 - procede-se ao cálculo da interpolação de intensidade.

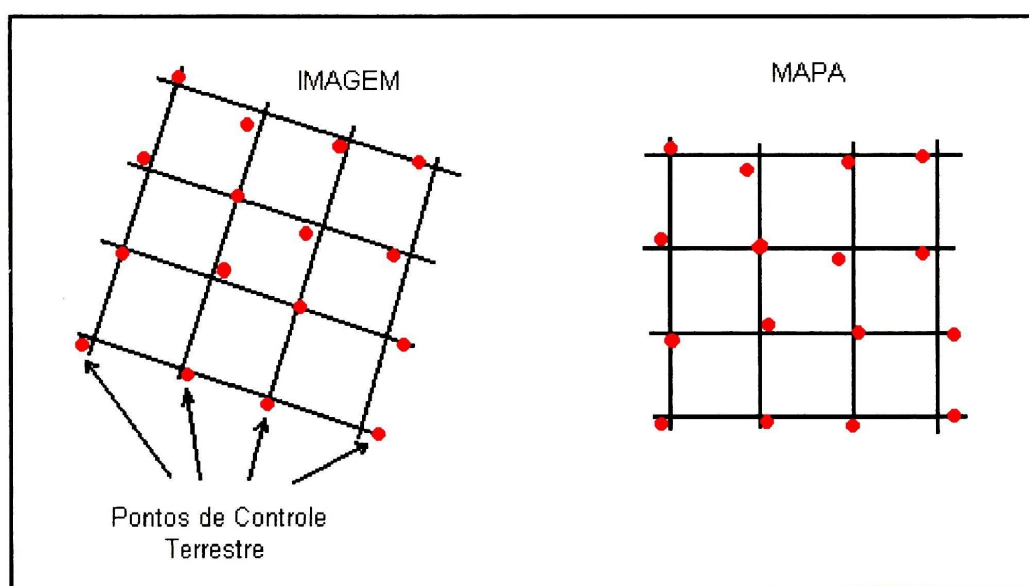


Figura 4 – Interpolação espacial.

Fonte: CRÓSTA, 1993 – Apud: VILELA, 1998.

Fonte: CRÓSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNICAMP. Campinas, SP. 170 p. 1993.

No processo de interpolação de intensidade, os valores numéricos (tons de cinza) da imagem original são extraídos e realocados na imagem corrigida (Figura 5). Este procedimento é comumente conhecido como reamostragem, e geralmente envolve três métodos de interpolação: vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica.

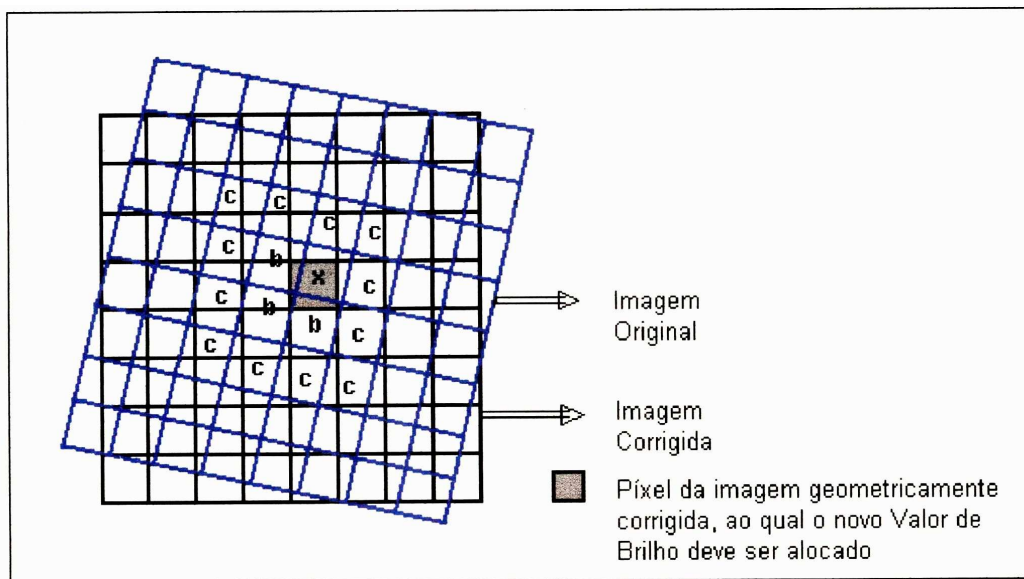


Figura 5 – Interpolação de intensidade.

Fonte: CRÓSTA, 1993 – Apud: VILELA, 1998.

2.5.1.2. Realce de imagens digitais

As técnicas de realce de imagens digitais são aplicadas aos dados com o objetivo de melhorar a aparência de uma imagem para facilitar a interpretação visual humana, bem como a interpretação automática via computador (SOARES, 2000).

Fonte: CRÓSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNICAMP. Campinas, SP. 170 p. 1993.

2.5.1.3. Classificação de imagens digitais

A terminologia “classificação” em imagens digitais significa associar a cada pixel de uma imagem, um rótulo ou tema. Desta forma, uma imagem numérica é transformada numa imagem temática (Figura 6), onde o número de categorias é definido pelo próprio analista (SOARES, 2000). Cada *pixel* é tratado como uma unidade individual composta de valores em várias bandas espectrais (CAMPBELL, 1987 – Apud: VILELA, 1998).

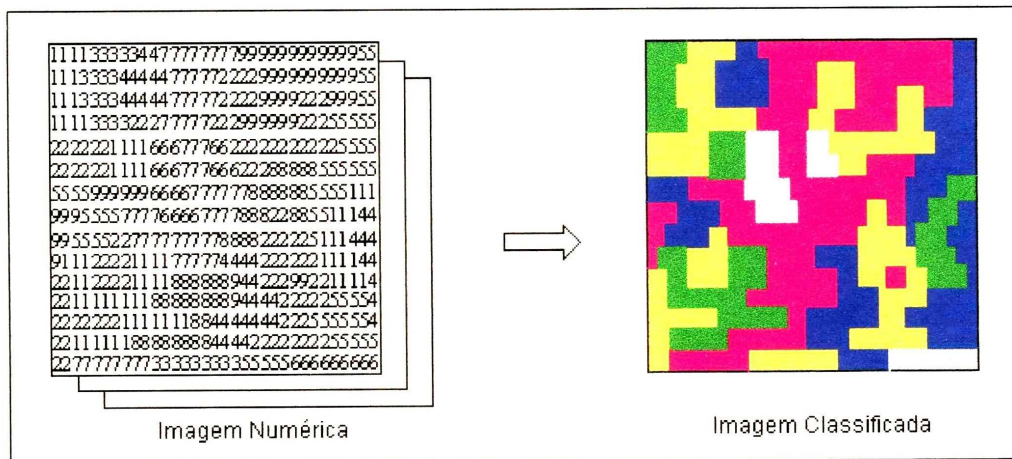


Figura 6 – Imagem numérica e imagem classificada.

Fonte: CAMPBELL, 1987 – Apud: VILELA, 1998.

A classificação de uma imagem digital pode ser enquadrada em duas grandes classes:

- Classificação supervisionada;
- Classificação não-supervisionada.

Fonte: CAMPBELL, J.B. **Introduction to Remote Sensing**. New York: The Guilford. 1987. 551p.

A classificação supervisionada pode ser definida como o processo de usar amostras de identidade conhecida para classificar *pixels* de identidade desconhecida. Neste tipo de classificação, a identidade e a localização de algumas feições, tais como agricultura, floresta, solos, etc., são conhecidas a priori, através da análise de campo, fotografias aéreas, mapas e experiência pessoal. O analista tenta localizar áreas específicas que representem exemplos homogêneos destas feições conhecidas. Estas áreas são comumente denominadas de amostras de treinamento (ATs).

Segundo LILLESAND & KIEFER (1994), um procedimento de classificação supervisionada envolve basicamente três etapas (Figura 7): seleção das amostras de treinamento (ATs), classificação propriamente dita e, produção de mapas temáticos e/ou tabelas sumarizando os resultados da classificação.

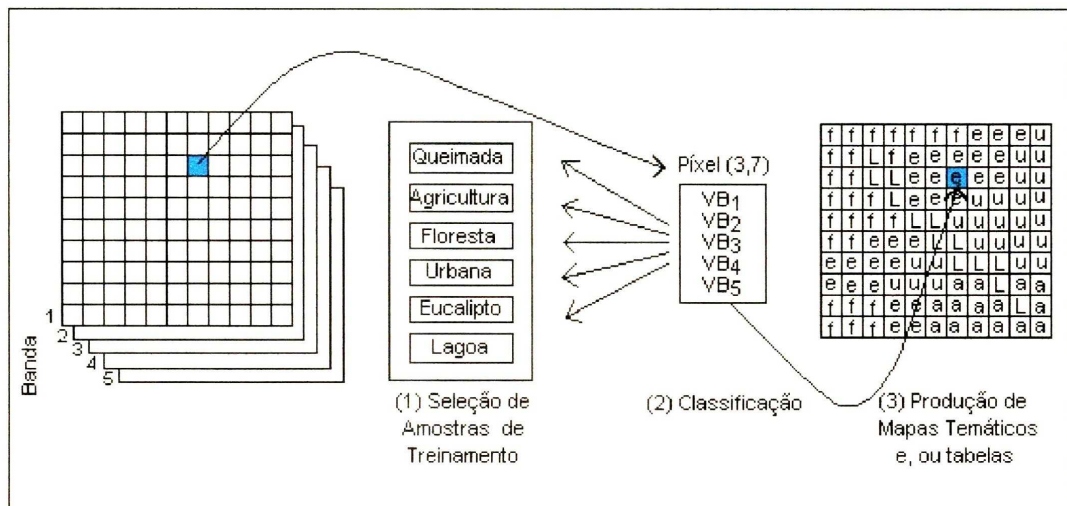


Figura 7 – Etapas básicas na classificação supervisionada.

Fonte: LILLESAND & KIEFER, 1994.

Na etapa de classificação propriamente dita, vários algoritmos de classificação podem ser utilizados para atribuir um *pixel* de identidade

desconhecida a uma determinada classe. Porém, os mais utilizados são o do Paralelepípedo, da Distância Mínima até a Média e da Máxima Verossimilhança (VILELA, 1998). Todos eles se baseiam em critérios estatísticos.

O algoritmo do Paralelepípedo utiliza a média e o desvio padrão, ou os valores máximos e mínimos das amostras de treinamento. O algoritmo da Distância Mínima até a Média utiliza a média das amostras de treinamento para relacionar um *pixel* desconhecido a uma dada classe. E finalmente, o algoritmo da Máxima Verossimilhança utiliza a média e a covariância das amostras de treinamento.

A classificação não-supervisionada, a priori, não requer conhecimento do analista em relação à área de estudo. O algoritmo “varre” toda a imagem e os *pixels* com características espectrais similares são agrupados em classes com base em critérios estatísticos pré-determinados. Após a classificação, o analista tenta identificar as classes geradas pelo computador (água, solo, floresta, etc).

2.5.2. Sistema de informação geográfica

O SIG é uma forma particular de Sistema de Informação, aplicado a dados geográficos. Um Sistema de Informação é um conjunto de processos executados no dado natural, produzindo informações úteis na tomada de decisões (CALIJURI et al., 1999).

Segundo RAMALHO et al. (1994), sistema de informação geográfica pode ser considerado como um conjunto de técnicas de informação, de desenvolvimento e de utilização de sistemas computacionais, envolvendo entidades com expressão espacial (tamanho e forma) e referência à terra (localização no espaço), auxiliando na tomada de decisões.

Muitas pessoas quando falam em SIG referem-se, especificamente, ao programa e não à tecnologia. Porém, o programa é apenas um dos cinco

componentes básicos do SIG. Os outros componentes são: computadores e periféricos, dados, profissionais, e métodos.

2.5.2.1. Amostragem do mundo real

Segundo CALIJURI et al. (1999), a amostragem do mundo real deve considerar que:

- O mundo é infinitamente complexo;
- O conteúdo do banco de dados espaciais representa uma visão particular do mundo real;
- O usuário vê o mundo real através do banco de dados;
- Os dados contidos no banco de dados devem apresentar uma visão o mais completa e precisa possível do mundo real;
- O conteúdo do banco de dados deve ser relevante em termos de temas e características armazenadas, período de tempo coberto e área de estudo.

A Figura 8 apresenta um esquema da representação temática de dados reais em SIG.



Figura 8 – Amostragem e representação de dados reais em SIG.
 Fonte: Adaptado de ESRI, 1999 – Apud: CALIJURI et al., 1999.

2.5.2.2. Representação de dados de mapas

Um SIG armazena dois tipos de dados que são encontrados em um mapa (CALIJURI et al., 1999):

- As definições geográficas das características da superfície da terra; e,
- Os atributos ou as qualidades que estas características possuem.

Existem duas técnicas de representação em SIG: vetorial (*vector*) e matricial (*raster*).

Fonte: ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. Site oficial. Disponível em <www.esri.com>. 1999.

Na representação vetorial, os limites das características são definidos por uma série de pontos, que, quando interligados com retas, formam a representação gráfica daquela característica. Os pontos são codificados com um par de números que dão as coordenadas x e y nos sistemas Latitude/Longitude, Universal Transversa de Mercator (UTM), etc. Os atributos das características são armazenados em um tradicional sistema gerenciador de banco de dados (DBMS).

Na representação matricial (*raster*), a representação gráfica das características e atributos que elas possuem são armazenados em arquivos de dados unificados. A área estudada é subdividida em uma malha de células onde é registrado a condição ou atributo da superfície do terreno naquele ponto. A cada célula (*pixel*) é atribuído um valor numérico que pode representar uma característica identificadora, um código de atributo qualitativo ou um valor quantitativo de atributo.

A Figura 9 mostra as feições cartográficas – pontos, linhas e áreas – representadas pelos formatos: vetorial (*vector*) e matricial (*raster*).

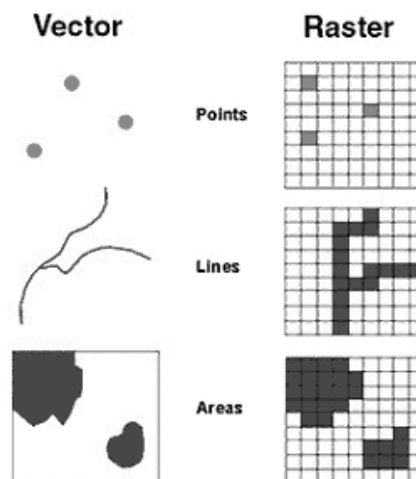


Figura 9 – Feições cartográficas (pontos, linhas e áreas) representadas pelos formatos: vetorial (*vector*) e matricial (*raster*).

Fonte: ESRI, 1999 – Apud: CALIJURI et al., 1999.

Fonte: ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. Site oficial. Disponível em <www.esri.com>. 1999.

2.6. Análise multicritério em ambiente SIG

A introdução de rotinas de apoio à decisão no ambiente SIG tem possibilitado um aumento na flexibilidade e na complexidade das análises efetuadas com essa ferramenta. Uma das grandes áreas de aplicação desses novos conceitos são as análises de impacto, aptidão ou viabilidade, por excelência áreas de aplicação de SIG (WEBER et al., 1998).

A Análise Multicritério é uma ferramenta de apoio à decisão em SIG, porque envolve uma variedade de dados geográficos, e possibilita uma sistematização de todos os critérios envolvidos no processo, assim como uma interação do analista com todas as etapas intermediárias.

A partir da sua utilização, ocorreu uma revolução no que se refere ao monitoramento e gestão de recursos naturais e uso do solo, preocupações atuais e principalmente futuras. Hoje, alguns conflitos existentes no mundo se devem a ocupação dos espaços geográficos; e futuramente a água será o “pivô” central de outros conflitos, pois a quantidade de água em qualidade adequada para o consumo humano diminui rapidamente.

Os dois principais tipos de análises realizadas em ambiente SIG são: a análise booleana, e a análise envolvendo fatores em escala contínua de adequabilidade.

2.6.1. Análise booleana

Segundo CALIJURI et al. (2000a), na análise booleana as informações são consideradas como restrições, ou seja, limitações absolutas que definem áreas aptas (1) e não aptas (0).

Normalmente os valores dos diferentes critérios não são comparáveis entre si, o que inviabiliza a sua agregação imediata (RAMOS & MENDES, 2001). Torna-se necessário padronizar para a mesma escala de valores, neste caso, um (1) e zero (0).

Após a padronização dos critérios em restrições, segue o processo de análise booleana com o uso de operações para agregações das mesmas, a saber:

- And – apresenta *aversão ao risco*, pois o resultado da agregação entre as restrições requer que todos os critérios sejam satisfeitos. A operação é a multiplicação (semelhante à interseção entre conjuntos).
- Or – apresenta *risco extremo*, pois o resultado da agregação entre as restrições requer que pelo menos um critério seja satisfeito. A operação é a adição (semelhante à união entre conjuntos).

Esta análise apresenta algumas limitações, dentre elas, pode-se citar:

- Os limites são rígidos, ou seja, as áreas são aptas (1) ou não aptas (0).
- Todos os critérios têm igual importância no mapa de adequabilidade. Porém, alguns critérios podem ter muito mais importância do que outros na determinação da adequabilidade de uma área.
- A adequabilidade em um critério não compensa a falta de adequabilidade em outro, assim não há compensação no processo de agregação.

As propriedades de não compensação e limites rígidos podem ser apropriadas em muitos casos; entretanto em outros poderiam ser mais interessante que um critério pudesse compensar o outro. Isto estaria condicionado a um certo grau de adequabilidade (CALIJURI et al., 2000a).

2.6.2. Análise em termos de adequabilidade

Na análise em termos de adequabilidade, as informações são consideradas como fatores, ou seja, limitações relativas que definem algum grau de aptidão às regiões geográficas. As restrições necessárias atuam como “máscaras” no final do processo de agregação (CALIJURI et al., 2000a).

2.6.2.1. Padronização dos critérios

Devido às diferentes escalas em que os critérios são medidos, é necessário que os fatores sejam padronizados em uma mesma escala contínua de adequabilidade para posterior combinação entre eles.

Em ambiente SIG, o módulo nomeado *Fuzzy* é provido de padronização de fatores usando funções de relacionamento dos conjuntos fuzzy.

Segundo EASTMAN (1999), o mesmo oferece quatro tipos de funções de relacionamento:

1. Sigmoidal (“s-shaped”) – é a função mais comumente utilizada. Ela é elaborada usando a função co-seno, e requer as posições de quatro pontos de controle, ao longo do eixo das abscissas, governando a forma da curva; eles representam os pontos de inflexão. As Figuras 10a, 10b, 10c e 10d apresentam as variantes dessa função.

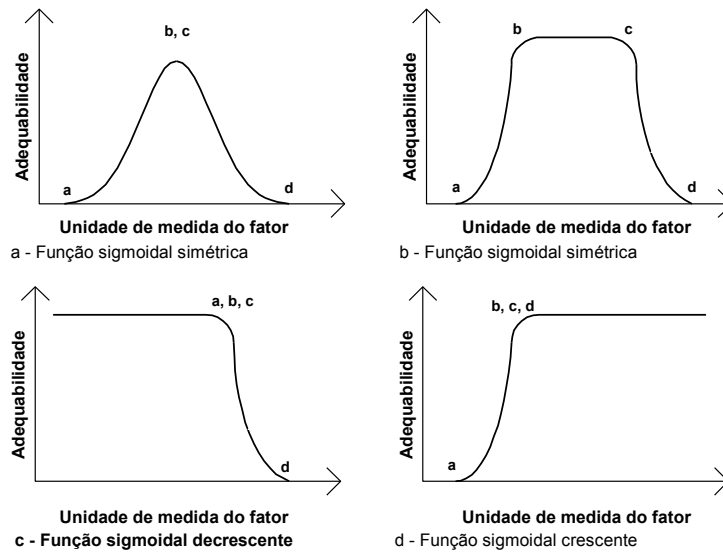


Figura 10 – Função sigmoidal e suas variantes.
(Adaptado de MELO, 2001)

2. *J-Shaped* – esta função é também bastante comum. As Figuras 11a, 11b, 11c e 11d mostram as diferentes possibilidades de funções *J-shaped* e as posições dos pontos de inflexão. Com o seu uso, a função chega a zero (0) no infinito.

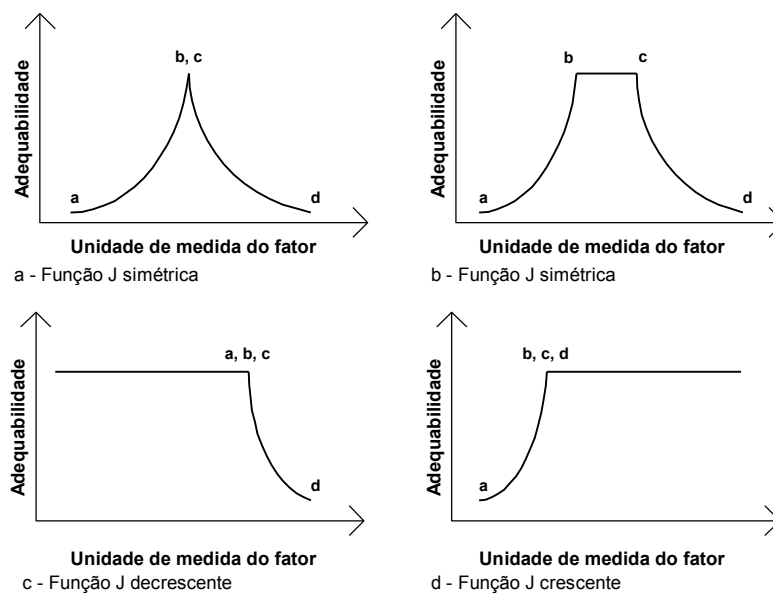


Figura 11 – Função *J-shaped* e suas variantes.

(Adaptado de MELO, 2001)

3. Linear – esta função é utilizada extensivamente em dispositivos eletrônicos que anunciam a lógica dos conjuntos fuzzy, em parte devido à sua simplicidade, mas também devido à necessidade de monitorar a produção de sensores essencialmente lineares. As Figuras 12a, 12b, 12c e 12d apresentam as variantes dessa função.

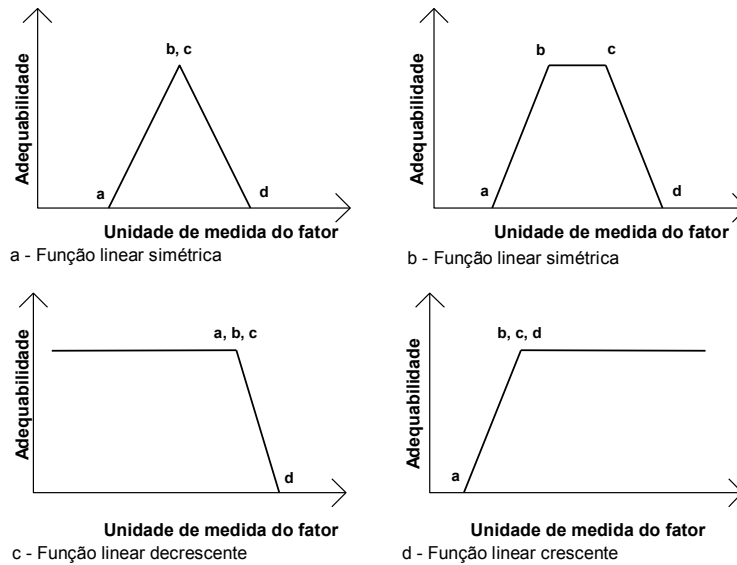


Figura 12 – Função linear e suas variantes.

(Adaptado de MELO, 2001)

4. Definida pelo usuário – quando o relacionamento entre o valor e o relacionamento fuzzy não segue alguma das três funções anteriores, a função definida pelo usuário é a mais aplicável. Um número ilimitado de pontos de controle pode ser utilizado. As Figuras 13a e 13b mostram alguns exemplos para essa função.

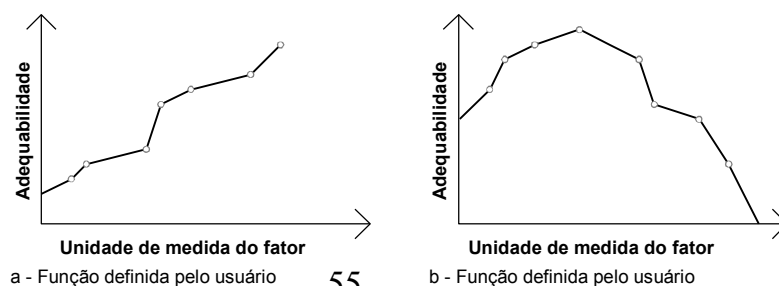


Figura 13 – Funções definidas pelo usuário.

(Adaptado de MELO, 2001)

Os fatores podem ser padronizados em escala de números reais de 0-1 ou em escala byte de 0-255. Esta última opção é recomendada pelo fato de que o módulo MCE foi otimizado para usar o nível de padronização de 0-255. O maior valor da escala padronizada representa o caso em que o elemento pertence, mais provavelmente, ao conjunto fuzzy.

Este tipo de análise é realizado através do processamento de cada localização (*pixel*) de uma imagem *raster* representativa do território em estudo, permitindo obter mapas contínuos de adequabilidade, ou seja, a imagem final é uma medida contínua de adequabilidade, variando entre a adequabilidade mínima e máxima.

Porém, quando os mapas a serem padronizados se referem a dados categóricos (polígonos), as padronizações são realizadas atribuindo valores de adequabilidades a cada polígono.

2.6.2.2. Pesos dos fatores

Existem vários métodos para atribuição de pesos e conseqüente cálculo dos pesos dos fatores.

O método mais comumente utilizado no contexto de um processo de tomada de decisão é a técnica de comparação de pares desenvolvida por SAATY (1977): Apud EASTMAN (1999), conhecida como o Processo de Hierarquia Analítico (*AHP – Analytical Hierarchy Process*).

Neste caso, as importâncias relativas entre os fatores são atribuídas e em seguida, os pesos ponderados, ou seja, os pesos dos fatores, são calculados

a partir do processamento de algoritmos especiais existentes nos programas SIG's.

A Figura 14 apresenta a tela de entrada dos valores das importâncias relativas entre os fatores para comparação par-a-par, no módulo WEGHT do programa Idrisi 32.

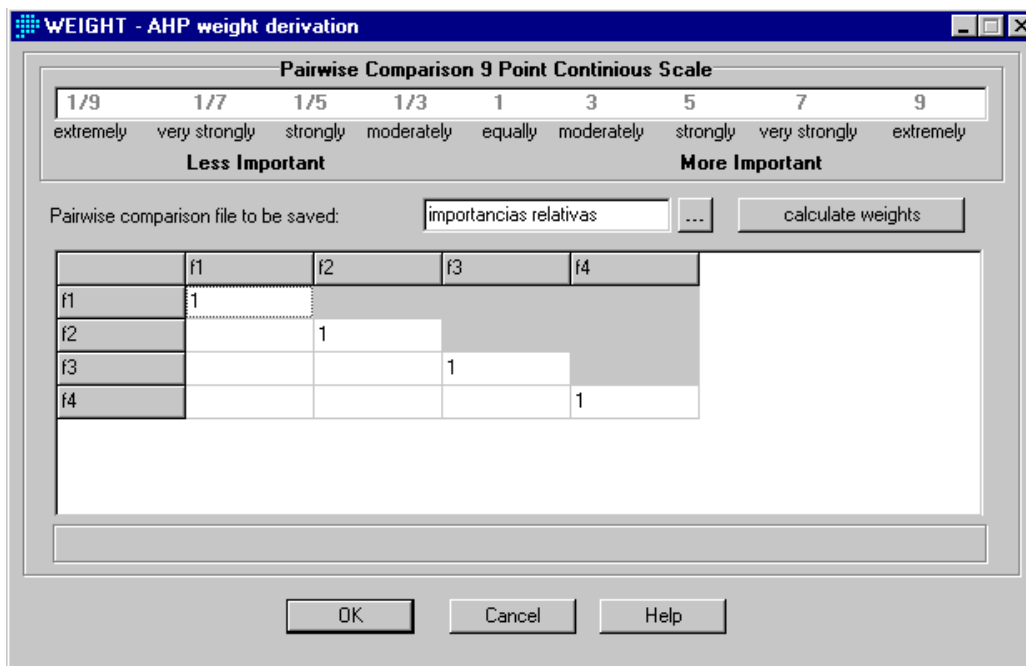


Figura 14 – Tela de entrada das importâncias relativas entre os fatores no módulo WEIGHT do programa Idrisi 32.

Fonte: SAATY, T. **A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures**. Journal of Mathematical Psychology, 15, pp. 234-281.

Simultaneamente ao cálculo dos pesos dos fatores, a razão de consistência (*CR – consistency ratio*) é também calculada. Ela indica a probabilidade que a matriz de categorias foi ocasionalmente gerada. Matrizes com categorias CR superiores a 0,10 devem ser reavaliadas.

A próxima etapa, então, é definir qual processo de decisão será aplicado aos critérios adotados, ou seja, qual a técnica de agregação entre eles, tendo em vista os objetivos desejados.

2.6.2.3. Agregação de critérios

Segundo RAMOS & MENDES (2001), existem diversas classes de operadores para a agregação de critérios, mas no âmbito dos processos de decisão de natureza espacial as mais relevantes são: a Combinação Linear Ponderada (WLC – *Weighted Linear Combination*) e a Média Ponderada Ordenada (OWA - *Ordinate Weighted Average*).

a. Combinação linear ponderada

A técnica de agregação denominada de Combinação Linear Ponderada (WLC – *Weighted Linear Combination*) permite a compensação total entre os fatores através da aplicação de pesos ponderados, também chamados de pesos dos fatores. O risco assumido na análise é médio, exatamente entre o AND (mínimo) e o OR (máximo) da Análise Booleana.

Com a utilização desta técnica, os fatores são combinados, aplicando um peso para cada um deles, seguido por uma adição dos resultados para produzir um mapa final de adequabilidade (Equação 11), isto é (EASTMAN, 1999):

$$S = \sum w_i x_i \quad (11)$$

Onde: S = adequabilidade

w_i = peso do fator i

x_i = registro do critério para o fator i

Em casos onde restrições booleanas também se aplicam, o procedimento pode ser modificado multiplicando a adequabilidade calculada dos fatores pelo produto das restrições (Equação 12), isto é:

$$S = \sum w_i x_i * \prod c_j \quad (12)$$

Onde: c_j = registro do critério para a restrição j

\prod = produto

A Figura 15 apresenta a tela de entrada dos fatores e restrições no módulo MCE_WLC programa Idrisi 32.

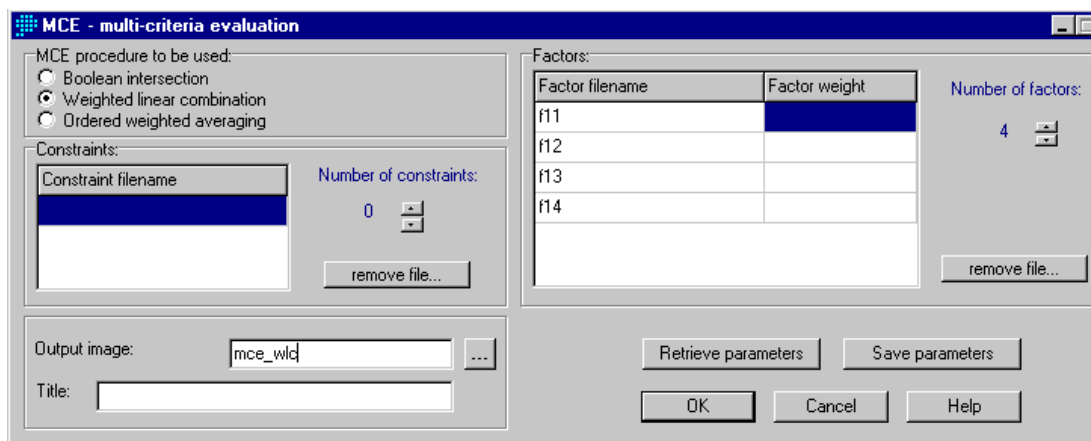


Figura 15 – Tela de entrada dos fatores e restrições no módulo MCE_WLC do programa Idrisi 32.

b. Média ponderada ordenada

A técnica de agregação denominada de Média Ponderada Ordenada (OWA – *Ordinate Weighted Average*) permite a compensação entre os fatores

através da aplicação de pesos ponderados – ou pesos dos fatores, e também permite controlar o nível do risco assumido na análise e o grau de compensação entre eles através da aplicação de um segundo conjunto de pesos, chamados de pesos ordenados.

O nível de risco depende da posição dos pesos ordenados no *ranking* e da magnitude dos seus valores. Valores maiores nas primeiras posições representam menor risco. Valores maiores nas últimas posições representam maior risco.

O grau de compensação depende da distribuição dos valores pesos ordenados no *ranking*.

Valores distribuídos em todas as posições representam compensação total.

Valor em apenas uma posição representa análise sem compensação.

A Figura 16 mostra a tela de entrada dos fatores e restrições no módulo MCE_OWA programa Idrisi 32.

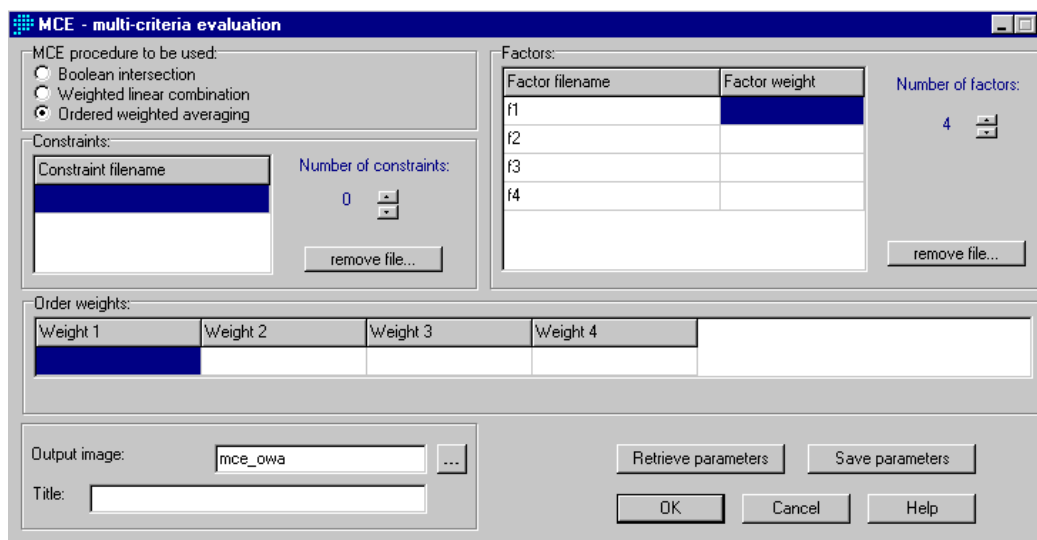


Figura 16 – Tela de entrada dos fatores e restrições no módulo MCE_OWA do programa Idrisi 32.

O deslocamento relativo dos pesos ordenados no sentido do mínimo ou do máximo controla o nível de risco (também designado por *ANDness*); por sua vez, a homogeneidade de distribuição destes pesos pelas posições controla o nível global de compensação (RAMOS & MENDES, 2001).

O resultado é um espaço de decisão, aproximadamente triangular, definido por um lado pela atitude de risco e, por outro lado, pelo nível de compensação (Modificada de EASTMAN et al., 1998: Apud RAMOS & MENDES, 2001), como se observa na Figura 17.

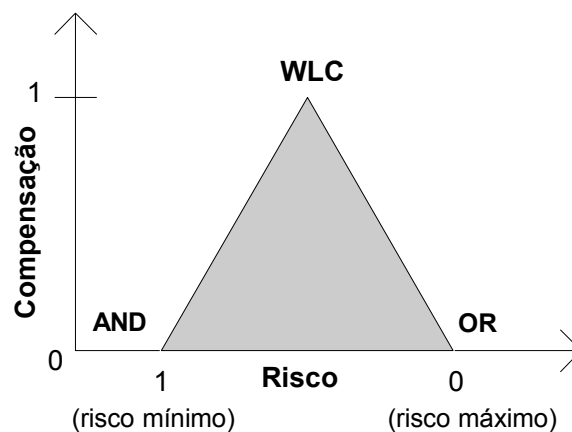


Figura 17 – Espaço Estratégico de Decisão.
(Adaptado de MELO, 2001)

A atitude de risco é medida pela variável Risco, dada pela Equação 13 (Adaptado de EASTMAN et al., 1998):

$$\text{Risco} = \frac{1}{n-1} \sum_i [(n-i)O_i] \quad (13)$$

Fonte: EASTMAN, J.R.; JIANG, H.; TOLEDANO, J. **Multi-Criteria and Multi-Objective decision Making for Land Allocation Using GIS**. In Beint, E.; Nijkamp, P.

(Eds), *Multicriteria Analysis for Land-Use Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 227-251. 1998.

O grau de compensação é medido pela variável Compensação, dada pela Equação 14:

$$\text{Compensação} = 1 - \sqrt{\frac{n \sum_i \left(O_i - \frac{1}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (14)$$

Onde n é o número total de fatores, i é a ordem do fator e O_i é o peso ordenado para o fator i .

Em casos onde restrições booleanas também se aplicam, o procedimento pode ser modificado multiplicando a adequabilidade calculada dos fatores pelo produto das restrições.

2.6.3. Estrutura do modelo de análise multicritério

Segundo RAMOS et al. (2001), o modelo de avaliação é estruturado por níveis hierárquicos de análise, podendo definir-se dentro de cada grupo de critérios. Estes grupos são processados de acordo com uma seqüência que envolve a sua normalização (ou padronização), a aplicação dos pesos respectivos e a sua combinação.

Esta seqüência, a implementar num ambiente SIG para cada grupo de critérios e nível de análise, é apresentada na Figura 18, onde se indicam também as técnicas de Avaliação Multicritério aplicáveis.

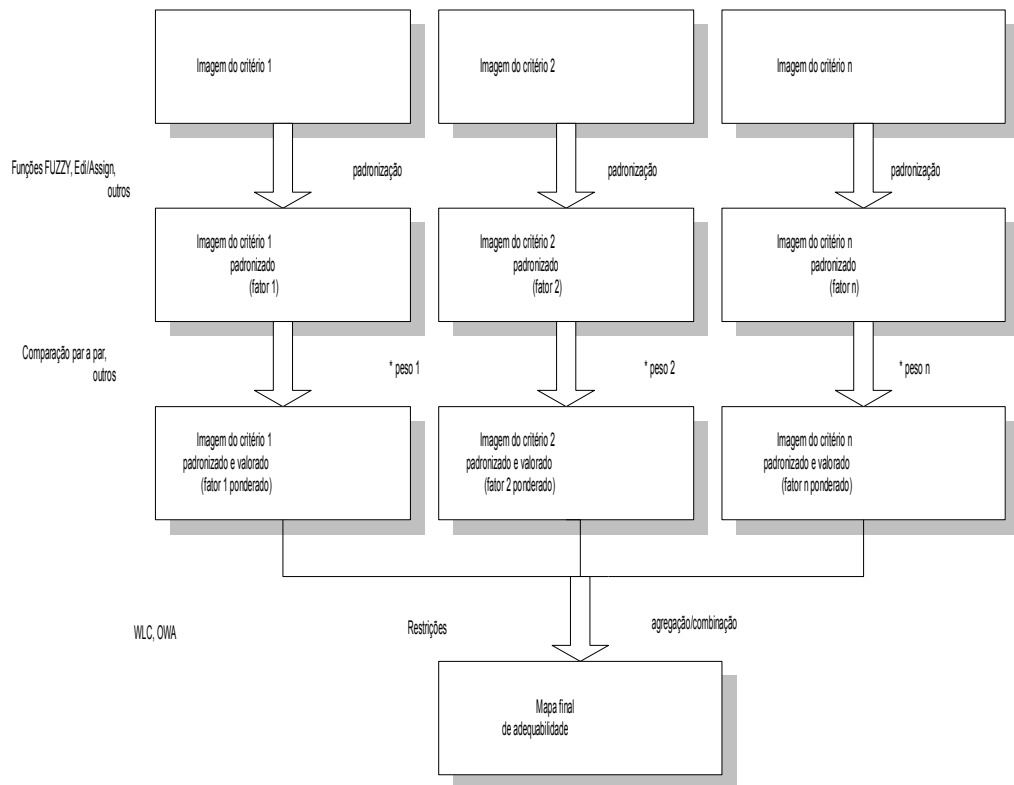


Figura 18 – Estrutura de análise por nível e grupo de critérios (Adaptado de RAMOS et al., 2001).

3. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização e divisões administrativas

A área de estudo compreende o município de Belo Horizonte e 57 municípios adjacentes a ele, localizados na parte central do Estado de Minas Gerais. A posição geográfica desta região apresenta as seguintes coordenadas UTM (m): 552.136 N e 657.406 N, 7.732.500 E e 7.843.770 E. Ou ainda, as seguintes coordenadas geográficas: W 44°30' e W 43°30' longitude, S 20°30' e S 19°30' latitude. Compreende uma superfície de 11.713,40 km². Limita-se ao norte e ao sul pelos municípios de Matozinhos e Belo Vale, respectivamente; a leste por Santa Bárbara e a oeste por Mateus Leme.

A Figura 19 apresenta a localização da área de estudo no Estado de Minas Gerais e a Figura 20 mostra a localização da Região Metropolitana de Belo Horizonte nessa área.

Alguns municípios se encontram totalmente dentro da área de estudo, enquanto outros apenas parcialmente, conforme Figura 21. A distância máxima entre eles e os limites municipais de Belo Horizonte são de 73.283, 78 metros.

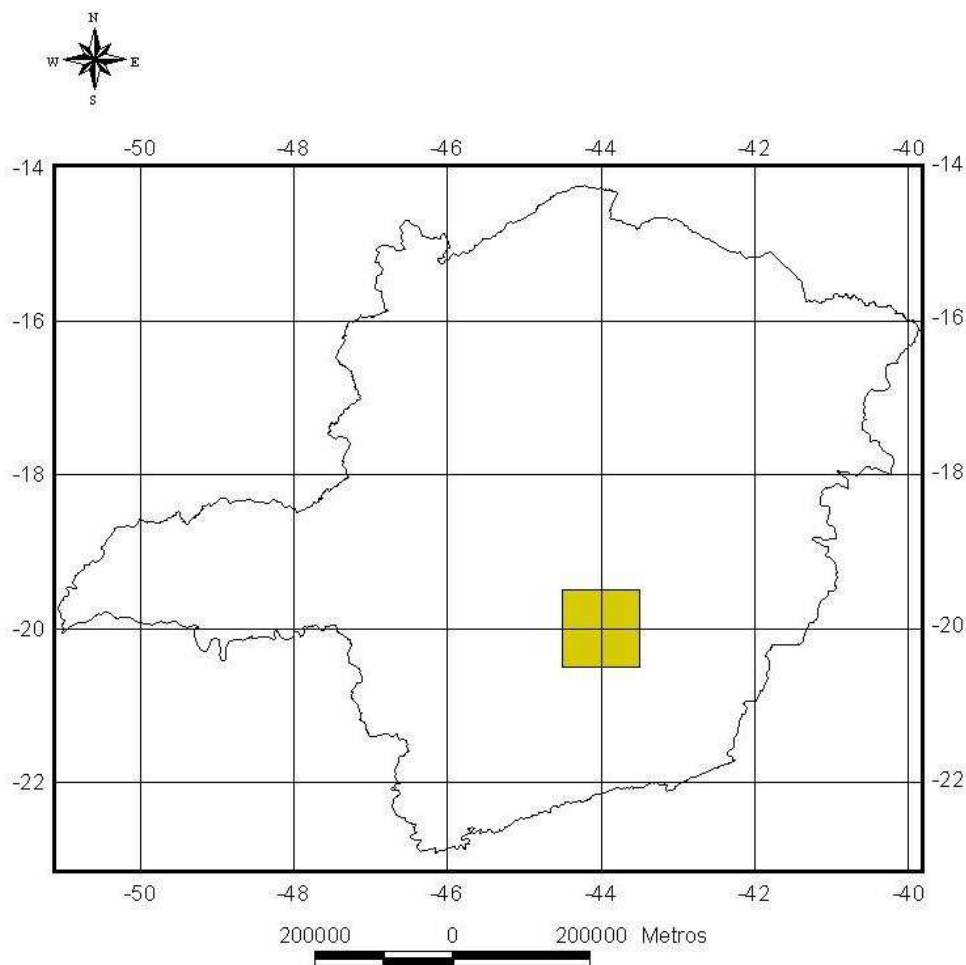


Figura 19 – Localização da área de estudo no Estado de Minas Gerais.

3.2. Aspectos fisiográficos

3.2.1. Relevo

Na área de estudo, as altitudes variam entre 650 metros e 1.900 metros. Esta considerável diferença entre as altitudes mínima e máxima é um fator preponderante na indicação de elevadas inclinações do terreno, ou seja, as declividades são muito significativas em algumas regiões. Como consequência, o relevo misto é constituído de regiões planas com declividades quase nulas, e regiões montanhosas com declividades superiores a 1000%.

Isto se confirma através das Unidades de Relevo do Brasil (IBGE, 1993: Apud OLIVEIRA & BRITO, 1998) para esta área, que são: Depressão Alto/Médio São Francisco, Planalto Centro-sul de Minas e Serra do Espinhaço/Quadrilátero Ferrífero.

O modelo digital do terreno (MDT) foi gerado para visualização da forma e distribuição da superfície topográfica. Ele foi obtido através da interpolação das curvas de nível e é apresentado na Figura 22.

A partir do modelo digital do terreno, gerou-se a carta de declividades (Figura 23). Esta por sua vez, foi reclassificada para obtenção de uma carta de classes de declividades (Figura 24), sendo elas: Classe 1 – > 30%; Classe 2 – 20% a 30%; Classe 3 – 10% a 20%; e, Classe 4 – 0 a 10%.

3.2.2. Geologia

Observa-se na área de estudo uma diversidade geológica do substrato e também a presença de formações superficiais de características variadas.

Nos mapeamentos geológicos pesquisados – CPRM e CETEC, são encontradas feições litológicas pertencentes ao Período Arqueano, onde se encontram as rochas mais antigas, até aquelas mais jovens pertencentes ao Período Quaternário, como aluviões, coberturas indiferenciadas e coberturas detríticas. Existem também na área, rochas básicas e ultrabásicas de idade incerta, como gabros, diabásio, anfíbolitos e outros.

As designações dos Tempos Geológicos, Supergrupos, Grupos, Unidades, Siglas e tipos de rochas (de acordo com suas formações), seguem a nomenclatura dos mapas e relatórios segundo CETEC (1984).

As estruturas geológicas também são variadas e distribuídas por toda a área. Verifica-se a presença de falhas, algumas de grande extensão,

Fonte: IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Unidades de Relevo do Brasil**. Rio de Janeiro (RJ). Escala 1:500.000. 1993.

principalmente nas direções NE-SW e NW-SE, falhas de empurrão concentradas na parte SE da região de estudo, alguns diques de diabásio, e muitos lineamentos estruturais.

Toda essa diversidade geológica resulta em diversas condições de: fundação, estabilidade, trabalhabilidade dos materiais, condições hidrogeológicas, características de erodibilidade, condições de suporte para a construção subterrânea e características de vulnerabilidade dos terrenos a impactos da atividade humana, concentrada ou difusa, dentre outras. Junte-se a isto, aspectos particulares dos contextos geológico-geomorfológicos locais (CARVALHO & FANTINEL, 1994).

As Figuras 25 e 26 apresentam, respectivamente, as formações geológicas e as estruturas geológicas presentes na área de estudo.

3.2.3. Hidrografia

A área de estudo insere-se na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco.

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2001), bacia hidrográfica é a área drenada parcial ou totalmente por um ou vários cursos d'água.

O rio São Francisco possui 36 tributários principais, dos quais apenas 19 são perenes. Dentre estes, os rios Paraopeba e das Velhas estão presentes na área de estudo. Eles são afluentes pela margem direita e cortam a área nas respectivas direções aproximadas NW-SE e N-S.

A drenagem apresenta, em geral, padrão dendrítico, de densidade relativamente alta, conforme Figura 27. O padrão de drenagem constitui o arranjo, em planta, dos rios e cursos d'água dentro de uma bacia hidrográfica (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

3.2.4. Pedologia

A área de estudo contou com mapeamento pedológico na escala 1:250.000, como parte dos trabalhos de um grande projeto desenvolvido pelo CETEC (1984).

Segundo os relatórios pedológicos deste projeto, utilizou-se como princípio geral na ordenação dos solos a classificação que estava sendo desenvolvida pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos da EMBRAPA.

Observou-se na região estudada a presença de uma diversidade considerável de tipos de solos, conseqüência de distintos materiais de origem (diversidade geológica), ações intempéricas variadas, principalmente a ação da água da chuva e da temperatura, formas de relevo variadas, e também, devido a diferentes organismos modificadores de suas características físicas e químicas.

Os solos encontrados na área de estudo foram:

- Solos com horizonte B latossólico - Latossolos;
- Solos com horizonte B textural (não hidromórficos) – Podzólicos;
- Solos com horizonte B incipiente – Cambissolos;
- Solos hidromórficos; e,
- Solos pouco desenvolvidos – Solos aluviais e Solos litólicos.

Os solos com horizonte B latossólico – Latossolos – são muito antigos ou se desenvolveram de material fortemente intemperizado, resultando, como conseqüência, perfis profundos e bem drenados, onde a lavagem da sílica e as bases oferecem as condições mais favoráveis para formação de argilas de baixa capacidade de troca. Normalmente, são muito resistentes à erosão, face ao alto grau de estabilidade dos agregados, como também, à alta porosidade e permeabilidade relativamente alta. Porém, quando constituem unidade de

mapeamento em associação com cambissolos e/ou solos litólicos a erosão pode ser forte.

Os solos com horizonte B textural (não hidromórficos) – Podzólicos – além de suas características inerentes, apresentam nítido contraste entre horizontes, no que concerne a cores e/ou textura e estrutura.

Os solos com horizonte B incipiente – Cambissolos – são formados por material já alterado, com desenvolvimento de cor e estrutura, com ausência de estrutura da rocha em mais da metade do volume do horizonte. Não apresentam evidência significativa de lixiviação e não têm as propriedades que são características para o horizonte B textural e B latossólico. Dentre os cambissolos, são encontrados solos rasos a profundos, variação de cor desde amarela até vermelho-escura.

A erosão nos Podzólicos e Cambissolos pode variar de acordo com o relevo em que os mesmos se encontram. Assim, nas áreas de relevo suave ondulado a erosão pode ser considerada moderada, e quando o relevo é forte ondulado e montanhoso a erosão pode ser considerada forte.

Os solos hidromórficos reúnem todos os solos cuja evolução é, essencialmente, caracterizada pelo efeito de saturação com água, permanente ou temporária, e que se reflete no perfil do solo através de matéria orgânica no horizonte superficial e/ou presença: de cores cinzentas que indicam redução; mosqueado devido à segregação de ferro; e concreções de ferro e/ou manganês. Caracterizam-se por apresentarem cores cinzentas desde a superfície e horizonte gley. Este é formado pelos Gley Húmico e Gley Pouco Húmico.

Os solos aluviais são provenientes de deposições fluviais recentes, formando aluviões de cursos d'água, apresentando horizonte A diferenciado, seguido de camadas estratificadas com distribuição errática (desuniforme) de carbono e/ou de composição granulométrica. A limitação pela fertilidade natural pode ser considerada como nula a ligeira.

Os solos litólicos são rasos e possuem somente um horizonte A, assente diretamente sobre a rocha (R) ou sobre materiais desta rocha, em grau

avanzado de intemperização (C). A seqüência de horizonte é AR e/ou AC. Podem apresentar desenvolvimento de horizonte B, mas com espessura inferior a 15 cm. Normalmente, são encontrados em superfícies geomórficas recentes, onde a erosão é muito ativa. De um modo geral, estes solos são derivados de materiais originários os mais diversos. Na região do projeto de referência, são desenvolvidos principalmente de quartzitos, calcários e siltitos. São solos rasos e ocupam relevo acentuado, com presença constante de pedregosidade e rochiosidade.

Os afloramentos de rochas encontrados na área de estudo constituem tipos de terrenos não propriamente solos. São representados por exposições de diferentes tipos de rochas. Eles aparecem mais continuamente nas regiões que compreendem alinhamentos de serras que compõem o Espinhaço, e sob a forma de lajeados e afloramentos.

Os tipos de solos presentes na área de estudo são mostrados na Figura 28.

3.2.5. Clima

Segundo a classificação climática de Köppen para o Brasil, os tipos de clima para a área de estudo são: Cwa e Cwb. Köppen propôs uma classificação para determinar as regiões climaticamente homogêneas, ou seja, regiões que apresentam as mesmas condições de temperatura, precipitação, umidade, etc.

As duas classificações consideram os climas temperados quentes, com temperatura média do mês mais frio entre 18°C e -3°C, sendo a época mais seca coincidente com o inverno no hemisfério correspondente, existindo um mês com precipitação média inferior a 60 mm. A razão entre as precipitações mensais mínimas e máximas tem que ser inferior a 1/10 (OLIVEIRA & BRITO, 1998).

O tipo climático Cwa é aquele cuja temperatura média do mais quente é superior a 22°C, sendo considerado como clima temperado chuvoso com

inverso seco e verão chuvoso. Enquanto o tipo Cwb é aquele cuja temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C e, durante pelo menos quatro meses é superior a 10°C, sendo considerado como clima temperado chuvoso, porém subtropical de altitude.

Segundo dados do Programa Geominas (GEOMINAS, 2000), as temperaturas médias anuais na área de estudo variam entre 19°C a 21°C, e nas proximidades das regiões mais montanhosas, elas são inferiores a 19°C. As precipitações totais anuais na maior parte da área variam entre 1200 mm a 1500 mm, e em pequenas regiões, aproximadamente na parte central e na parte sudeste, variam, respectivamente, entre 1000 mm e 1200 mm e valores superiores a 1500 mm.

3.3. Aspectos de uso e ocupação do solo

A verificação dos tipos de uso e ocupação do solo presentes na área de estudo foi realizada com o auxílio da imagem orbital – composição das bandas 3, 4 e 5 – (Figura 29), obtida pelo sensor TM (Thematic Mapper) a bordo do satélite Landsat-5 (órbita-base 218, ponto 74), tomada em outubro de 1998, e cedida pelo DER-MG em formato digital. A resolução desta imagem é 30 metros.

Observando esta imagem de satélite (Figura 29), verificou-se também a presença de várias represas e/ou lagoas na área de estudo.

3.3.1. Cobertura vegetal

As matas distribuem-se por toda a área de estudo, especialmente nos topos das elevações, nas partes mais íngremes e próximas a corpos d'água. Este tipo de cobertura vegetal é o mais expressivo da região, correspondendo, aproximadamente, a 30% de toda a área de estudo. Encontra-se situado na

parte centro-sul, onde predominam lagoas, rios e represas, mas principalmente as serras, onde a topografia é mais acentuada.

As áreas de pastagem ocorrem em menor espaço geográfico, ou seja, correspondem aproximadamente a 41% da área total. Provavelmente, são formadas por vegetação nativa ou plantada, composta principalmente por gramíneas e arbustos. Ocupam desde os topos das elevações até as regiões lindeiras aos corpos d'água.

3.3.2. Núcleos urbanos

A alta concentração de núcleos urbanos na área de estudo é decorrente do fato da mesma compreender a Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH – e outros municípios adjacentes a ela, ou seja, a maior parcela da população do Estado de Minas Gerais encontra-se nesta região.

De acordo com o censo do IBGE, ano 2000, a população total do Estado de Minas Gerais é de 17.866.402 habitantes, considerados como residentes. Com relação à população presente na área de estudo, este valor é de 5.114.356 habitantes residentes. Isto representa, aproximadamente, 29% da população total do Estado, ou seja, cerca de 1/3 de todos os habitantes encontram-se na área estudada. Os respectivos valores da população residente para cada município são apresentados no Quadro 5.

3.3.3. Aeroporto de Confins

O Aeroporto Internacional Tancredo Neves - mais conhecido por "Aeroporto de Confins" - é considerado um dos melhores e mais bem equipados aeroportos da América Latina. Todas as suas operações encontram-se certificadas pela ISO 9001 (PRÓ-CONFINS, 2002).

Quadro 5 – Municípios e suas respectivas populações residentes.

Id	Municípios	População residente (2000)	Id	Municípios	População residente (2000)
1	Barão de Cocais	23.334	16	Esmeraldas	47.072
2	Belo Horizonte	2.232.747	17	Florestal	5.636
3	Belo Vale	7.430	18	Fortuna de Minas	2.426
4	Betim	306.538	19	Ibirité	132.972
5	Bom Jesus do Amparo	4.813	20	Igarapé	24.748
6	Bonfim	6.865	21	Inhaúma	5.193
7	Brumadinho	26.607	22	Itabira	98.221
8	Cachoeira da Prata	3.778	23	Itabirito	37.900
9	Caeté	36.278	24	Itaguara	11.297
10	Capim Branco	7.897	25	Itatiaiuçu	8.508
11	Catas Altas	4.239	26	Itaúna	76.783
12	Confins	4.883	27	Jaboticatubas	13.523
13	Congonhas	41.252	28	Jeceaba	6.114
14	Contagem	537.806	29	Juatuba	16.402
15	Crucilândia	4.471	30	Lagoa Santa	37.854

Fonte: IBGE, 2001.

Continua...

Continuação...

Id	Municípios	População residente (2000)	Id	Municípios	População residente (2000)
31	Mariana	46.719	45	Raposos	14.268
32	Mario Campos	10.525	46	Ribeirão das Neves	246.589
33	Mateus Leme	24.124	47	Rio Acima	7.651
34	Matozinhos	30.154	48	Rio Manso	4.644
35	Moeda	4.465	49	Sabará	115.292
36	Nova Lima	64.295	50	Santa Bárbara	24.173
37	Nova União	5.428	51	Santa Luzia	184.721
38	Ouro Branco	30.366	52	São Joaquim de Bicas	18.156
39	Ouro Preto	66.256	53	São José da Lapa	15.012
40	Para de Minas	72.937	54	São José da Varginha	3.224
41	Pedro Leopoldo	53.902	55	Sarzedo	17.298
42	Piedade dos Gerais	4.271	56	Sete Lagoas	184.692
43	Piracema	6.508	57	Taquaraçu de Minas	3.486
44	Prudente de Moraes	8.186	58	Vespasiano	76.427

Fonte: IBGE, 2001.

Alguns destaques, como: a segurança oferecida aos usuários, a localização, a engenharia de projeto e de construção e, ainda, suas condições operacionais para aeronaves de grande porte, lhe valeram o grau de "excelente", conforme o último "Diagnóstico Aeroportuário", uma publicação da Embratur.

Ele foi inaugurado em 1984 e está localizado em uma região privilegiada. Fica na divisa dos municípios de Confins e Lagoa Santa, a 40 km da capital mineira, na Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, em Minas Gerais. Ao contrário de seus congêneres nacionais e mundiais, pode se expandir sem problemas. É, assim, o único aeroporto do Brasil com grandes possibilidades de expansão, já previstas em projeto, e com área reservada.

Inserido na RMBH, o aeroporto integra a infra-estrutura da terceira maior aglomeração urbana, que se consolida como o maior entroncamento rodoviário e ferroviário do país. Trata-se, portanto, de um centro populacional, geográfico e econômico e que, num raio de mil km, abrange quase 70% da riqueza nacional. O estado de Minas Gerais, por sua vez, ostenta o segundo PIB industrial do país e o segundo lugar nas exportações, entre os estados da federação.

Contudo, as vias de acesso ao aeroporto de Confins ainda são deficitárias, não estimulando o seu uso rotineiramente. Os usuários, atualmente, preferem realizar o embarque e o desembarque em aeronaves que se destinam ao aeroporto da Pampulha, por este se localizar no município de Belo Horizonte.

As alternativas propostas neste trabalho para o Hiperanel Rodoviário da RMBH, têm como um dos objetivos estimular o trânsito de veículos de todas as regiões do Estado de Minas Gerais e de outros Estados da Federação, em direção ao aeroporto de Confins, possibilitando aos usuários a utilização dos serviços e usufruto de uma infra-estrutura de excelente qualidade.

A Figura 30 apresenta a localização do aeroporto de Confins na área de estudo, obtida através da digitalização sobre a imagem composta das bandas 3, 4 e 5, diretamente na tela do computador. Em conjunto, apresentam-se as

rodovias pavimentadas e não pavimentadas.

3.3.4. Estradas de rodagem

Segundo CARVALHO & FANTINEL (1994), um rápido exame da malha viária que serve a região revela um padrão radial dos sistemas federal e estadual centrados em Belo Horizonte (MG), sem alternativas de qualidade para um tráfego que poderia passar ao largo, permanecendo pouco desenvolvidas as áreas próximas fora desses eixos.

As estradas de rodagem são hierarquizadas em classes técnicas, de acordo com o tráfego que suportam, desde as de mais alto nível, as vias expressas, que constituem os grandes eixos rodoviários, até as vicinais e pioneiras que formam o primeiro nível de alimentação das primeiras (SANTOS et al., 1988: Apud ABGE, 1998).

Neste sentido, a área de estudo é servida por algumas das principais rodovias federais do país, em que o elemento de ligação entre elas é o Anel Rodoviário atual. São elas:

- BR-040: Brasília / Belo Horizonte / Rio de Janeiro;
- BR-262: Vitória / Belo Horizonte / Uberaba;
- BR-381: Governador Valadares / Belo Horizonte / São Paulo.

E também, por rodovias estaduais e municipais, todas apresentadas na Figura 31.

Dentre as rodovias citadas em informativo aos usuários do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais –

Fonte: SANTOS, A.R.; PASTORE, E.L.; AUGUSTO JR., F.; CUNHA, M.A. **Manual Técnico para Conservação e Recuperação de Estradas Vicinais de Terra.** São Paulo (SP). IPT – Publicação, 1770. 1988. 125p.

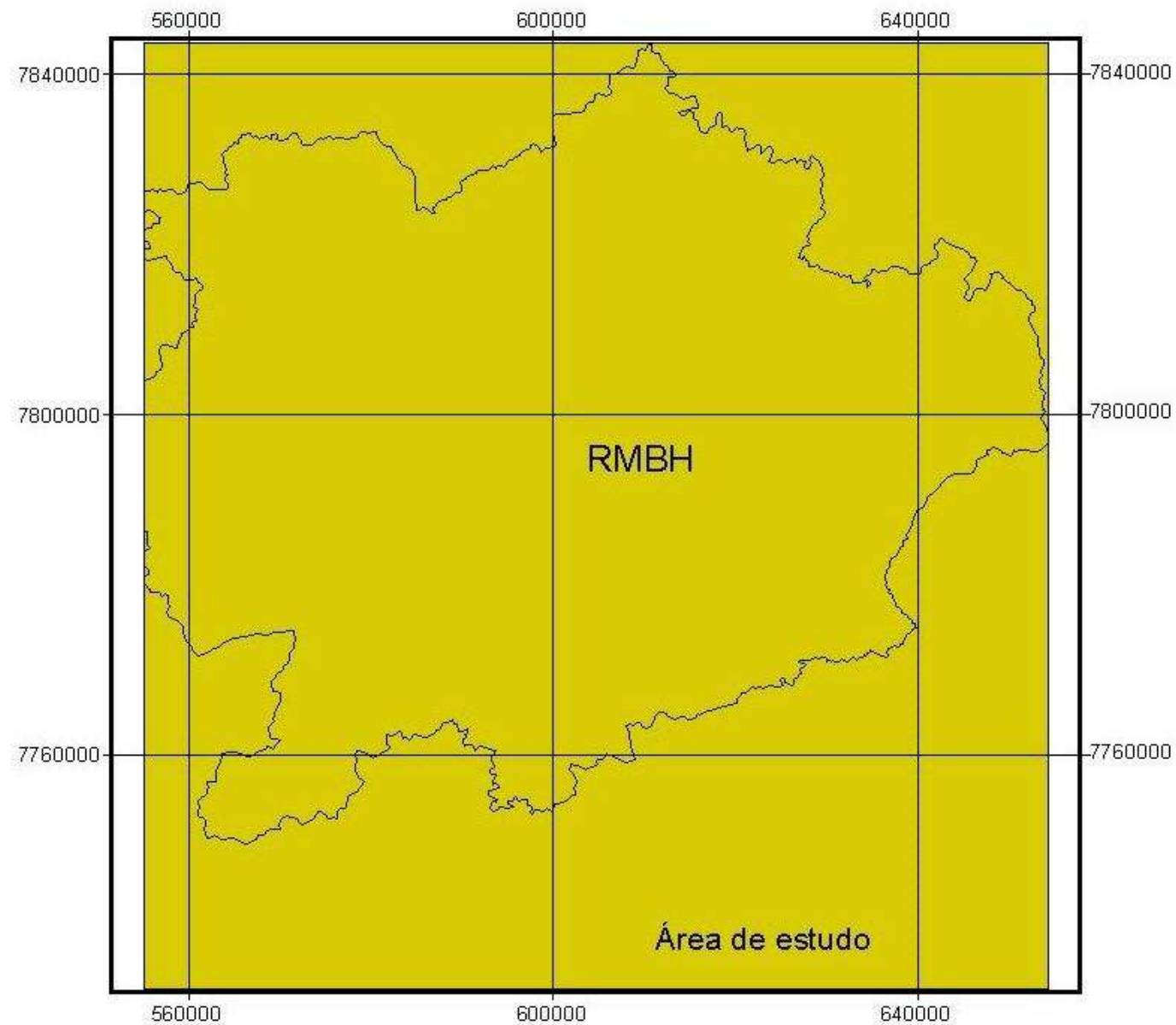
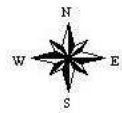
DER/MG, do dia 07/01/2002, algumas se encontram presentes na área de estudo. São elas:

- AMG-900 – trechos em meia pista, devido ao rompimento de aterro, no entroncamento com a MG-129, próximo ao município de Itabira, e devido à erosão no corpo do aterro, próximo ao acesso ao município de Cristina (km 1);
- BR-040 – em vários trechos, o pavimento encontra-se em péssimas condições e a pista apresenta vários problemas;
- MG-030 – trecho em meia pista no entroncamento para Raposos/Rio Acima (km 30,5).

Contudo, ao trafegar pelas outras rodovias, observa-se que na grande maioria, o pavimento encontra-se em péssimas condições de conservação e manutenção, assim como, a pista apresenta vários problemas, podendo citar alguns deles:

- Inexistência de acostamento;
- Acostamento com buracos;
- Acostamento ruim com pista em estado regular;
- Pista simples com buracos;
- Sinalizações, vertical e horizontal, deficientes;
- Erosão lateral ao longo da pista de rolamento.

O mapa correspondente às rodovias existentes na área de estudo (Figura 31) foi obtido através da digitalização sobre tela na imagem composta, pois o mapa rodoviário empregado no processo de correção geométrica da imagem orbital apresentou localizações diferenciadas das rodovias existentes na área em relação as suas corretas posições geográficas. O mapa rodoviário, em escala 1:1.500.000, não foi utilizado devido a sua escala ser pequena, inviabilizando sua aplicação neste trabalho.



Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Localização da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
na área de estudo

Universidade Federal de Viçosa
Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

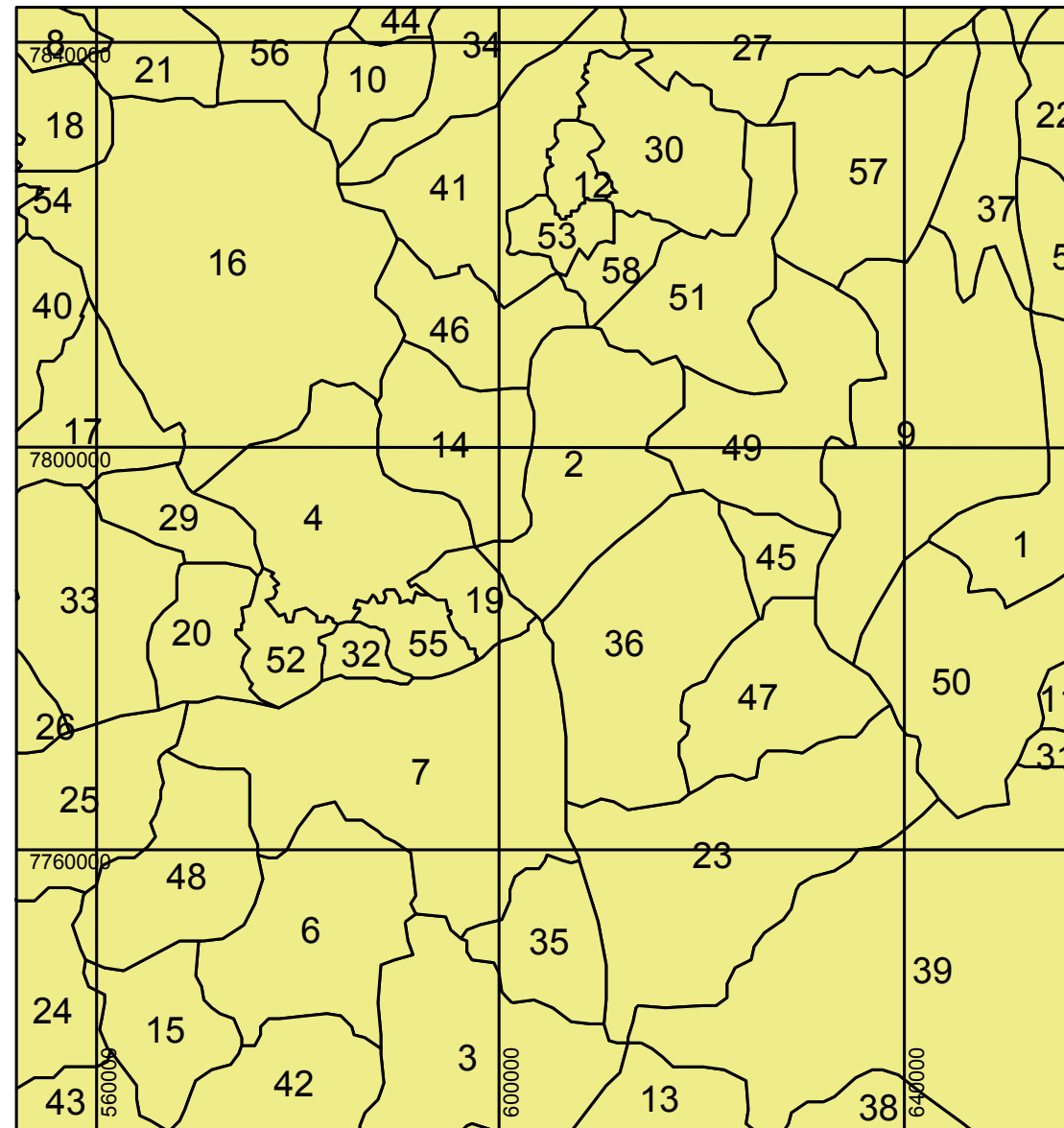
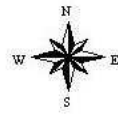
Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 20



20000 0 20000 Metros

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Divisões administrativas

Legenda:

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| 1. Barão de Cocais | 30. Lagoa Santa |
| 2. Belo Horizonte | 31. Mariana |
| 3. Belo Vale | 32. Mário Campos |
| 4. Betim | 33. Mateus Leme |
| 5. Bom Jesus do Amparo | 34. Matozinhos |
| 6. Bonfim | 35. Moeda |
| 7. Brumadinho | 36. Nova Lima |
| 8. Cachoeira da Prata | 37. Nova União |
| 9. Caeté | 38. Ouro Branco |
| 10. Capim Branco | 39. Ouro Preto |
| 11. Catas Altas | 40. Pará de Minas |
| 12. Confins | 41. Pedro Leopoldo |
| 13. Congonhas | 42. Piedade dos Gerais |
| 14. Contagem | 43. Piracema |
| 15. Craciândia | 44. Prudente de Moraes |
| 16. Esmeraldas | 45. Raposos |
| 17. Florestal | 46. Ribeirão das Neves |
| 18. Fortuna de Minas | 47. Rio Acima |
| 19. Ibirité | 48. Rio Manso |
| 20. Igarapé | 49. Sabará |
| 21. Inhaúma | 50. Santa Bárbara |
| 22. Itabira | 51. Santa Luzia |
| 23. Itabirito | 52. São Joaquim de Bicas |
| 24. Itaguara | 53. São José da Lapa |
| 25. Itatiaçu | 54. São José da Varginha |
| 26. Itaúna | 55. Sarzedo |
| 27. Jaboticatubas | 56. Sete Lagoas |
| 28. Jeceaba | 57. Taquaraçu de Minas |
| 29. Juatuba | 58. Vespasiano |

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

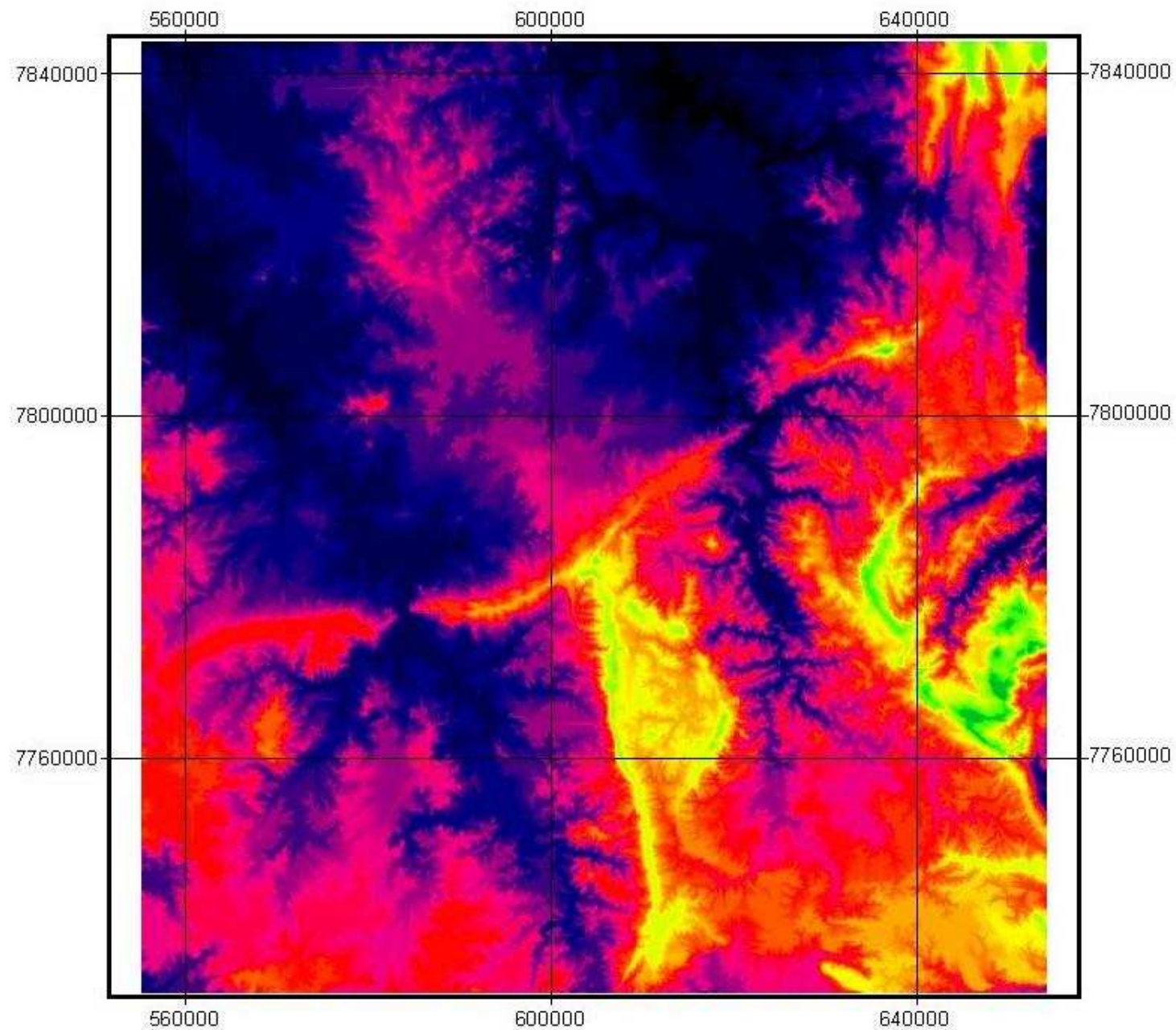
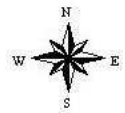
Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

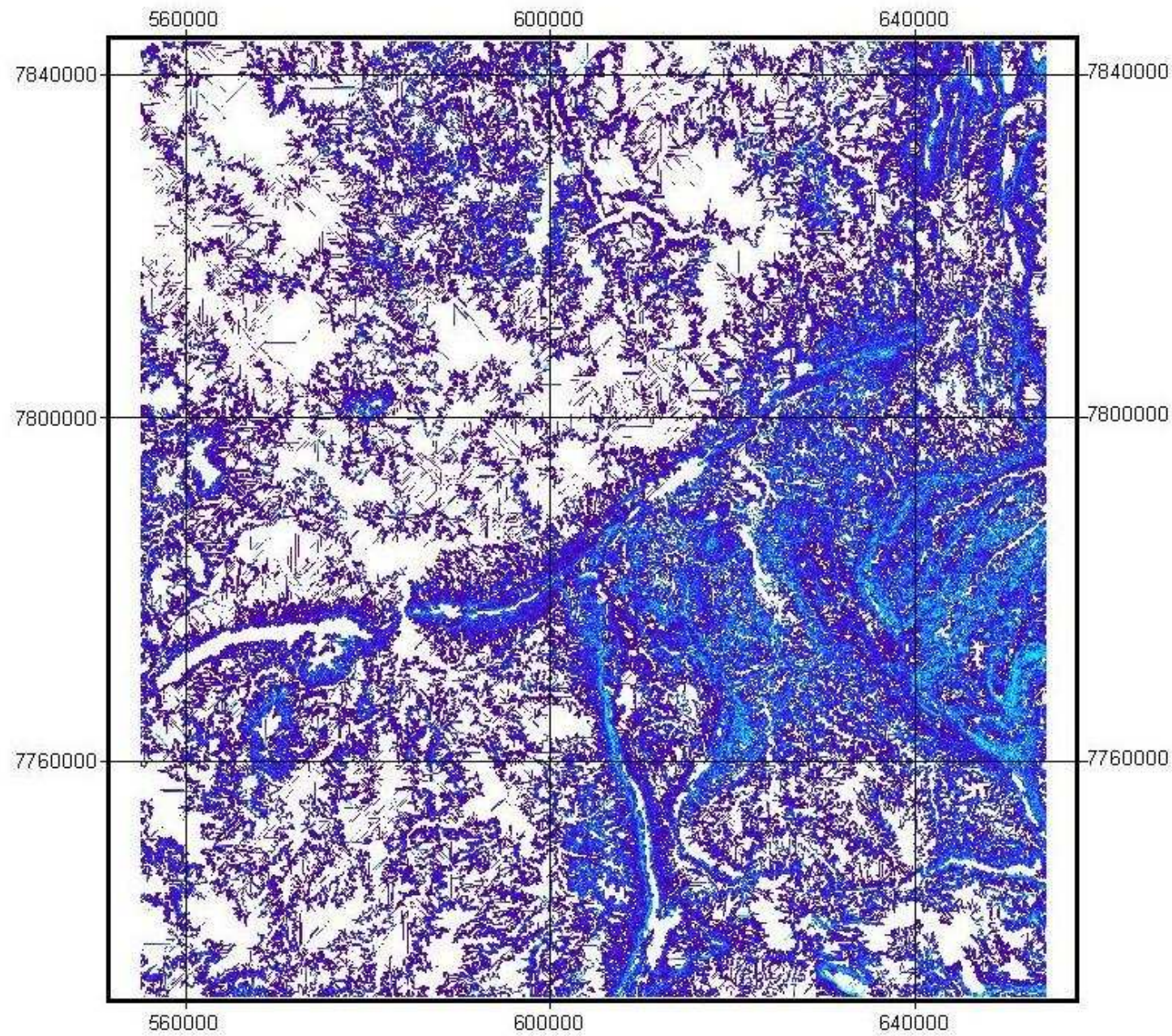
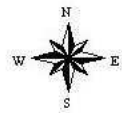
Data: 10/02/2002

Figura 21



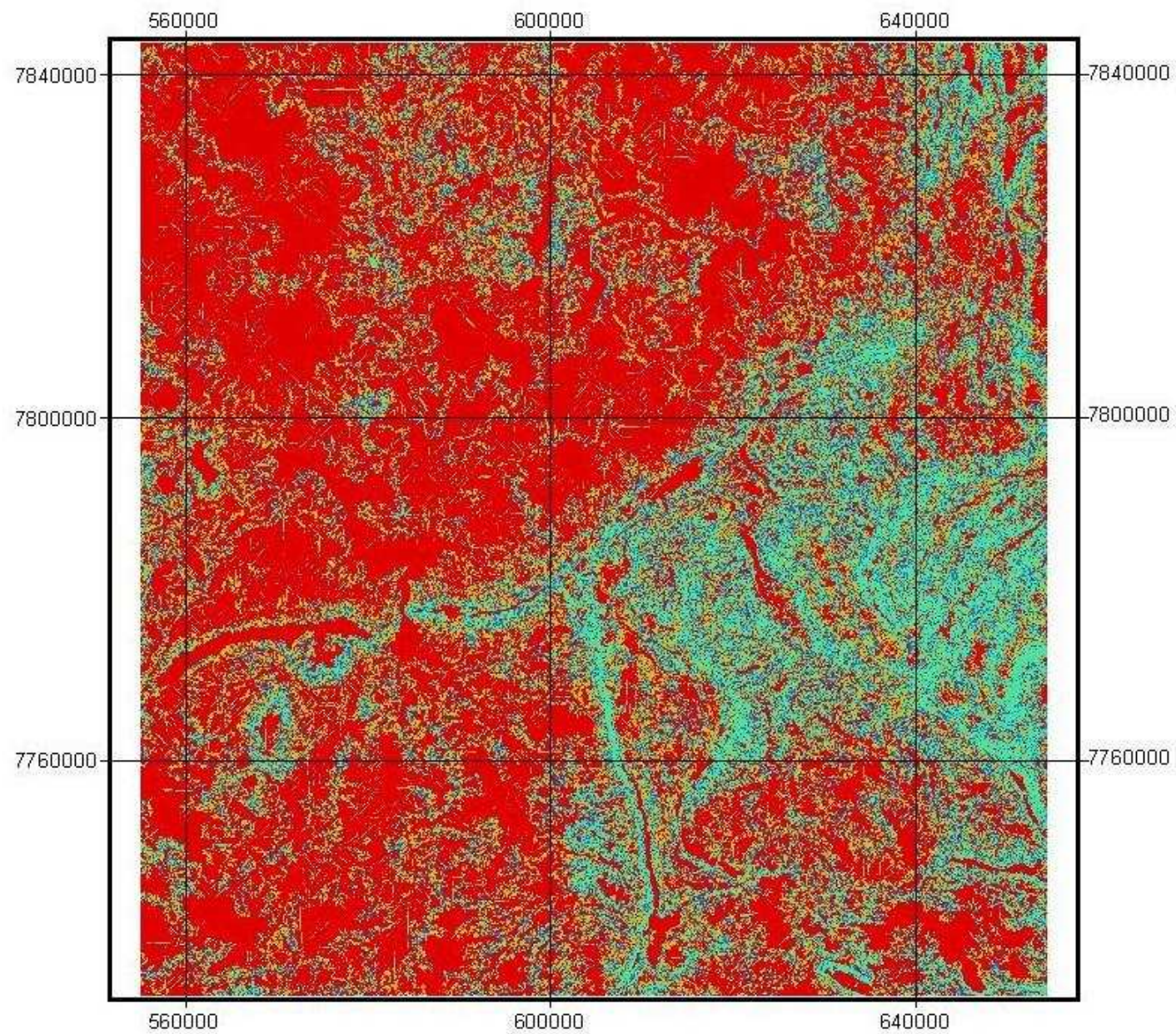
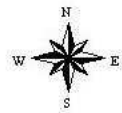
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema: Modelo Digital do Terreno
Legenda: Altitude (metros) 650.00 728.13 806.25 884.38 962.50 1040.63 1118.75 1196.88 1275.00 1353.13 1431.25 1509.38 1587.50 1665.63 1743.75 1821.88 1900.00
Universidade Federal de Viçosa Departamento de Engenharia Civil Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo
Dissertação de Mestrado: “Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”
Autora: Rossana Xavier Data: 10/02/2002
Figura 22



Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema: Carta de declividades
Legenda: Declividade (%) 0 74 147 221 295 368 442 516 590 663 737 811 884 958 1032 1105 1179
Universidade Federal de Viçosa Departamento de Engenharia Civil Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo
Dissertação de Mestrado: “Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”
Autora: Rossana Xavier Data: 10/02/2002
Figura 23



20000 0 20000 Metros

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:
Carta de classes de declividades

Legenda:
Intervalos de declividades

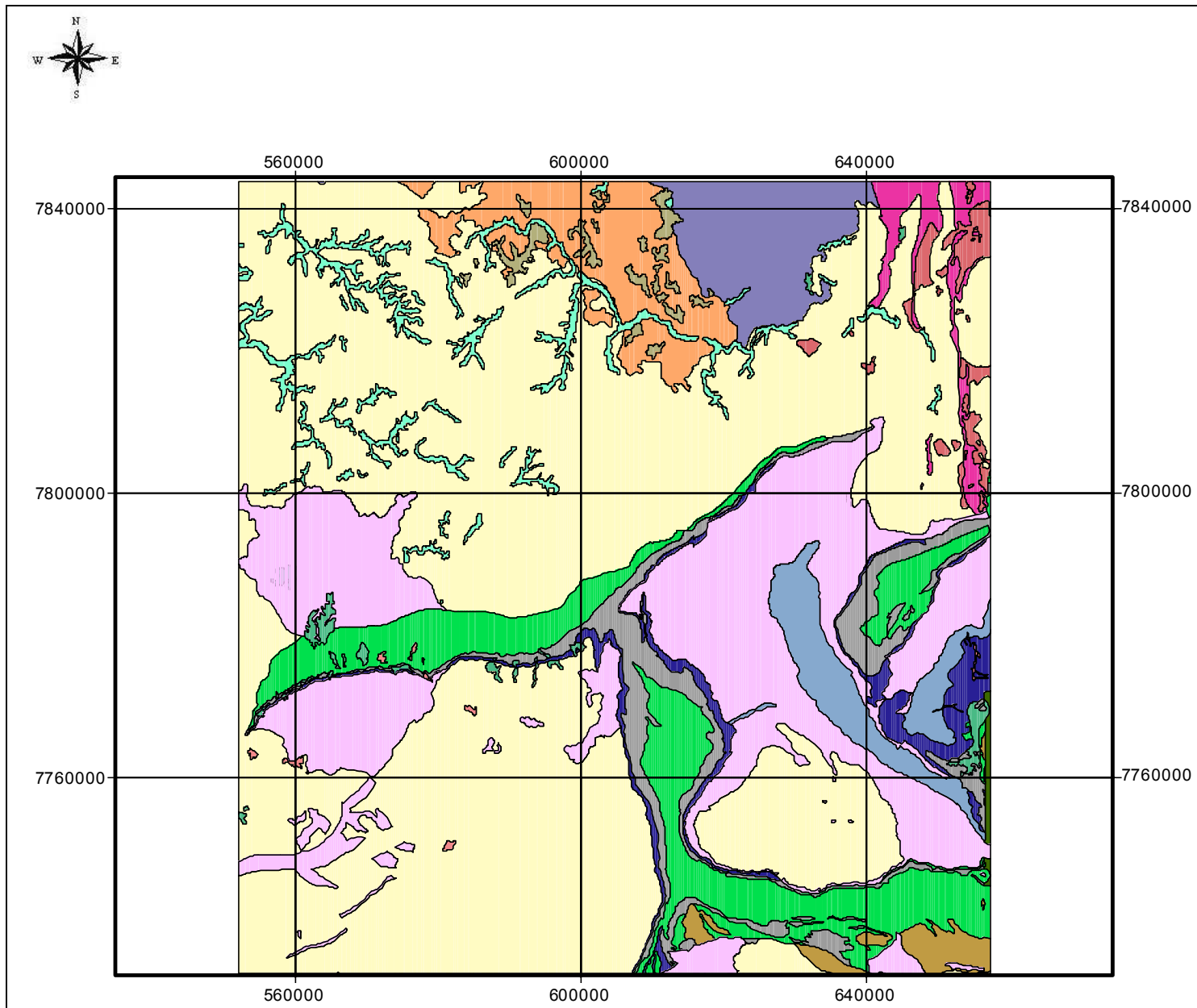
Green	> 30%
Blue	20 a 30%
Yellow	10 a 20%
Red	0 a 10%

Universidade Federal de Viçosa
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:
“Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier
Data: 10/02/2002

Figura 24



Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Unidades geológicas

Legenda:

- Qa - Aluviões: sedimentos arenosos, argilo-arenosos, localmente leitos de cascalhos
- Qp1 - Coberturas lúvico-oligocenas: sedimentos argilo-arenosos a arenosos
- TQd - Coberturas detriticas: sedimentos areno-argilosos a argilosos
- Pebp - Siltitos e ardósias, argilitos, calcários e margas
- Pebp(c) - Predomínio de calcários, geralmente de cor cinza-escuro com laminação
- Peel - Ortóquartzitos, quartzitos micropáticos e micáceos, metaconglomerados, filitos
- Peel(m) - Rochas metamórficas de composição ácida a básica
- Peit - Quartzitos, filitos e metaconglomerados
- Pem p - Filito, clorita-sericita-xisto, quartzito micropático e ferruginoso, dolomitos e metaconglomerado
- Pem l - Itabirito com leiras de hematita com pasta, com ilúvies micáceos e carbonáticos, dolomitos ferruginosos e filitos
- Pem c - Quartzitos finos a grossos com estratificação cruzada, metaconglomerados e filitos
- Pem l(Pem c) - Itabirito
- Pem - Quartzitos micáceos, mica-xistos, filitos e metaconglomerados
- Peril - Sequência ígnea-sedimentar: clorita-xisto, quartzito micaxisto, dolomitos, formações tér., quartzitos e itabirito serpent
- Pei - Gnaisses graníticos e bandados, granitoides, migmatitos, quartzo-xistos, leiras de anfibolitos, rochas quartzíticas
- B - Rochas básicas: gabros, diabásio, anfibolitos
- M B - Rochas ultrabásicas: piroxênitos, serpentinitos, esteatitos

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo

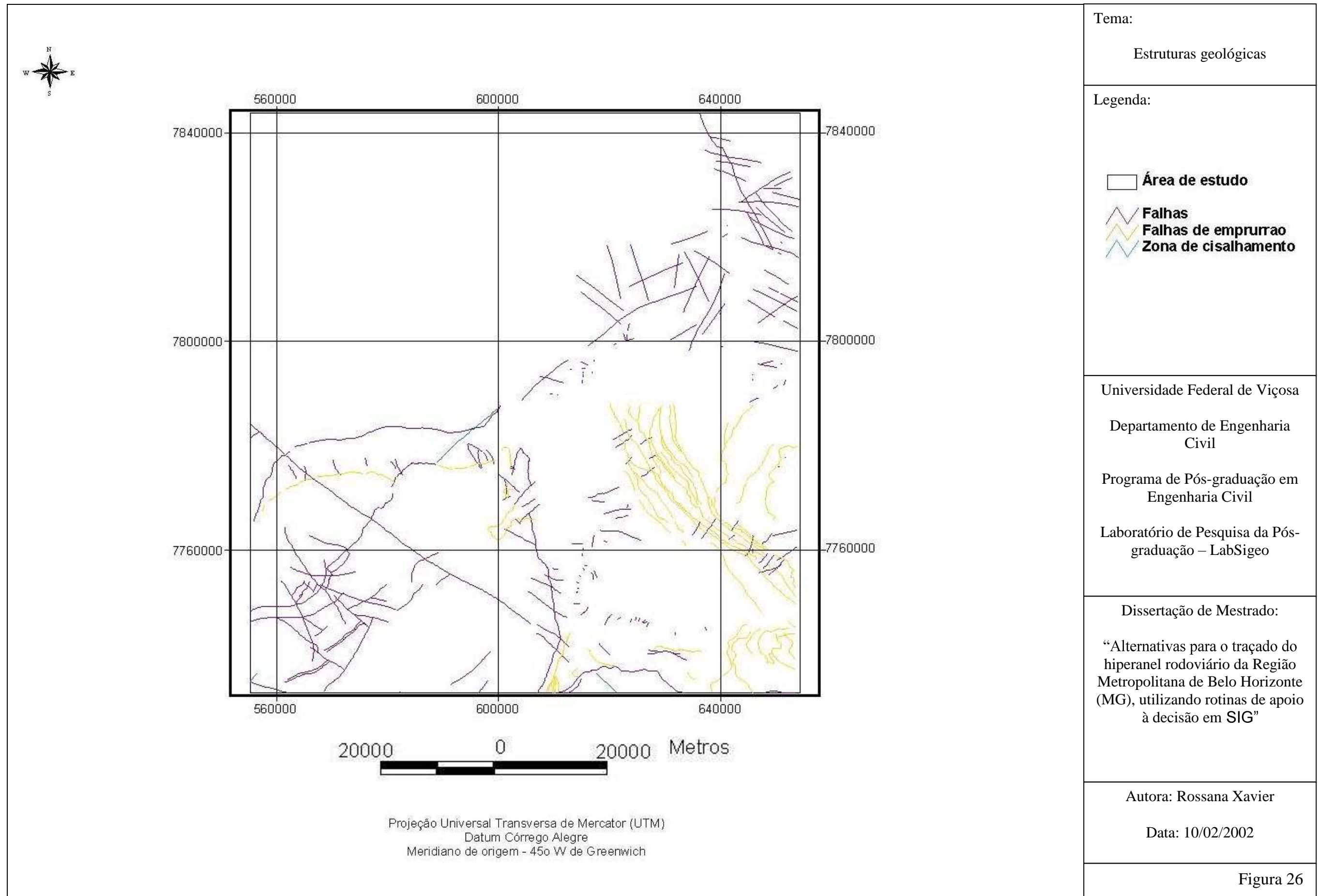
Dissertação de Mestrado:

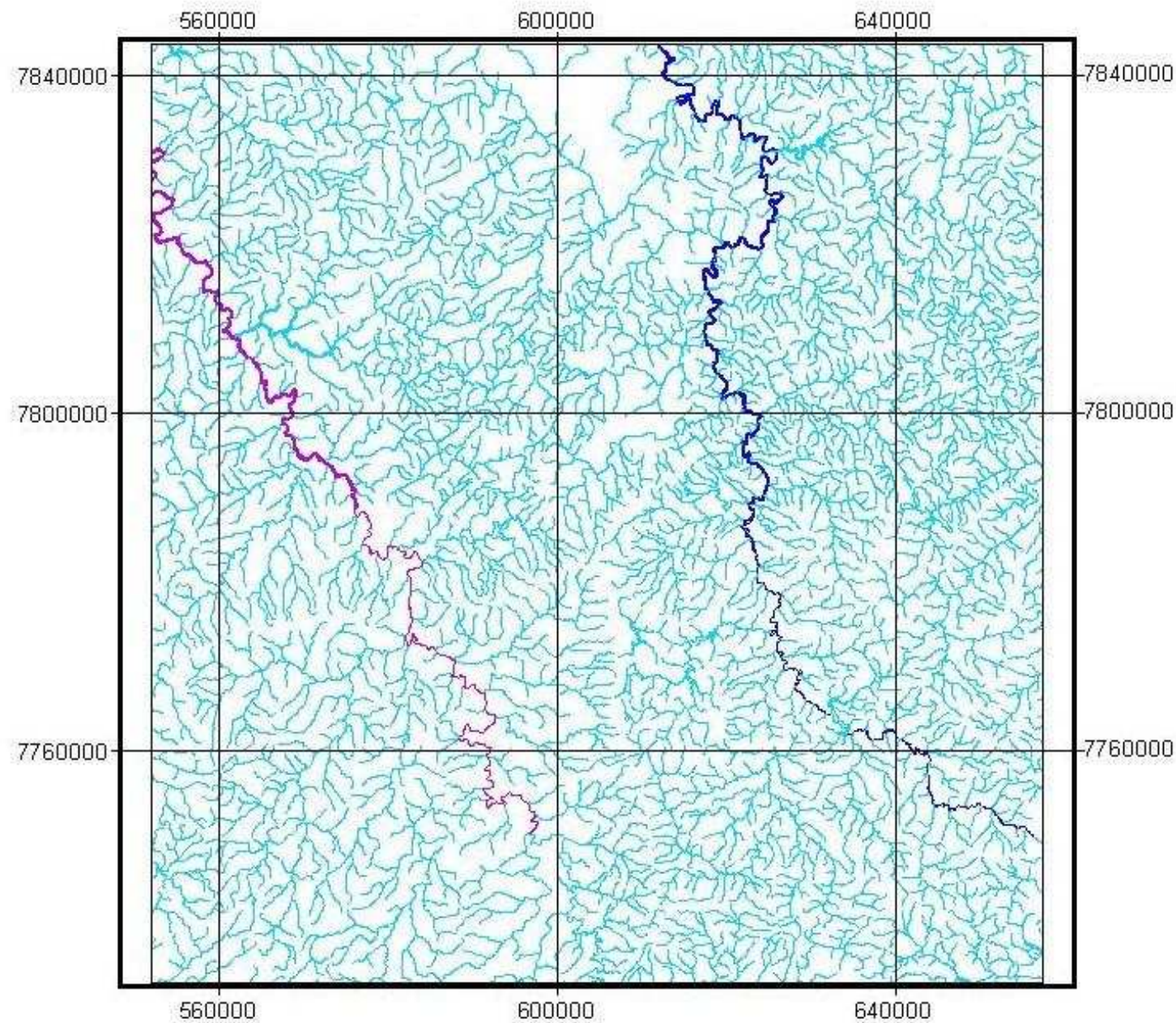
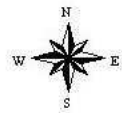
“Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 25





20000 0 20000 Metros

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Hidrografia

Legenda:

□ Área de estudo

Rios e outros cursos d'água

— Rio das Velhas
— Rio Paraopeba
— Córregos, riachos, ribeirões e outros rios

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

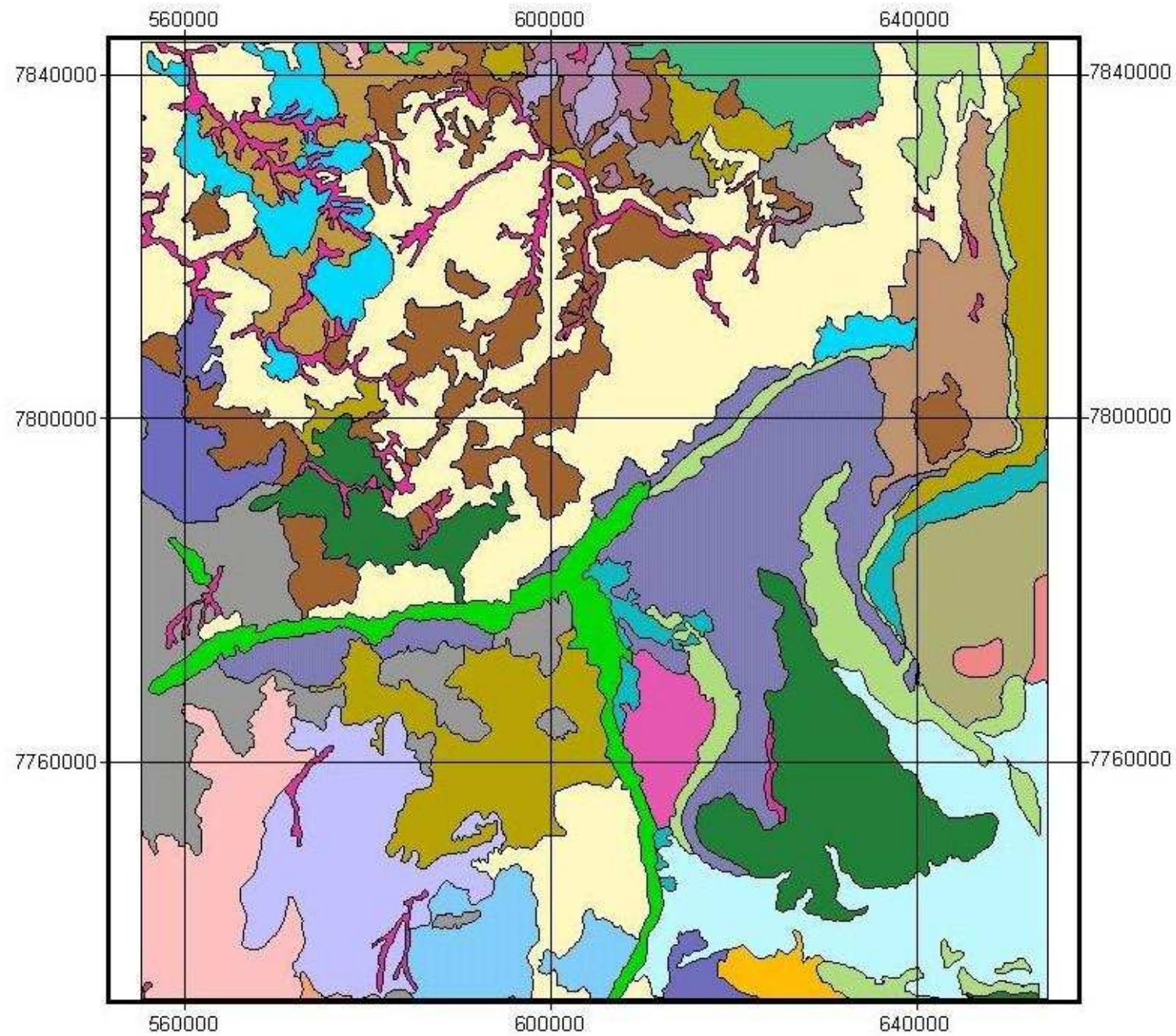
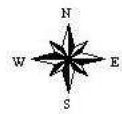
Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 27



Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Pedologia

Legenda:

Unidades pedológicas

- Afloramentos de rochas
- Afloramentos de rochas e solos litólicos (60%-40%)
- Cambissolo
- Cambissolo e Latossolo Vermelho Amarelo (60%-40%)
- Cambissolo e Podzólico Vermelho Amarelo (60%-40%)
- Cambissolo e solos litólicos (60%-40%)
- Cambissolo, Podzólico Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo (40%-30%-30%)
- Latossolo Ferrífero e Solos litólicos (70%-30%)
- Latossolo Vermelho Amarelo
- Latossolo Vermelho Amarelo e Cambissolo (60%-40%)
- Latossolo Vermelho Amarelo e Podzólico Vermelho Amarelo (70%-30%)
- Latossolo Vermelho Amarelo, Podzólico Vermelho Amarelo e Cambissolo (40%-30%-30%)
- Latossolo Vermelho Escuro
- Latossolo Vermelho Escuro e Cambissolo (70%-30%)
- Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho Amarelo (60%-40%)
- Latossolo Vermelho Escuro e Podzólico Vermelho Amarelo (60%-40%)
- Latossolo Vermelho Escuro e Terra Roxa (60%-40%)
- Podzólico Vermelho Amarelo
- Podzólico Vermelho Amarelo e Cambissolo (60%-40%)
- Podzólico Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo (60%-40%)
- Podzólico Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Escuro (60%-40%)
- Podzólico Vermelho Amarelo, Cambissolo e Solos litólicos (40%-30%-30%)
- Podzólico Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho Escuro e Afloramentos de rochas (40%-30%-30%)
- Solos aluviais e hidromórficos (60%-40%)
- Solos litólicos
- Solos litólicos e Cambissolo (70%-30%)
- Solos litólicos, Cambissolo e Afloramentos de rochas (40%-30%-30%)

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo

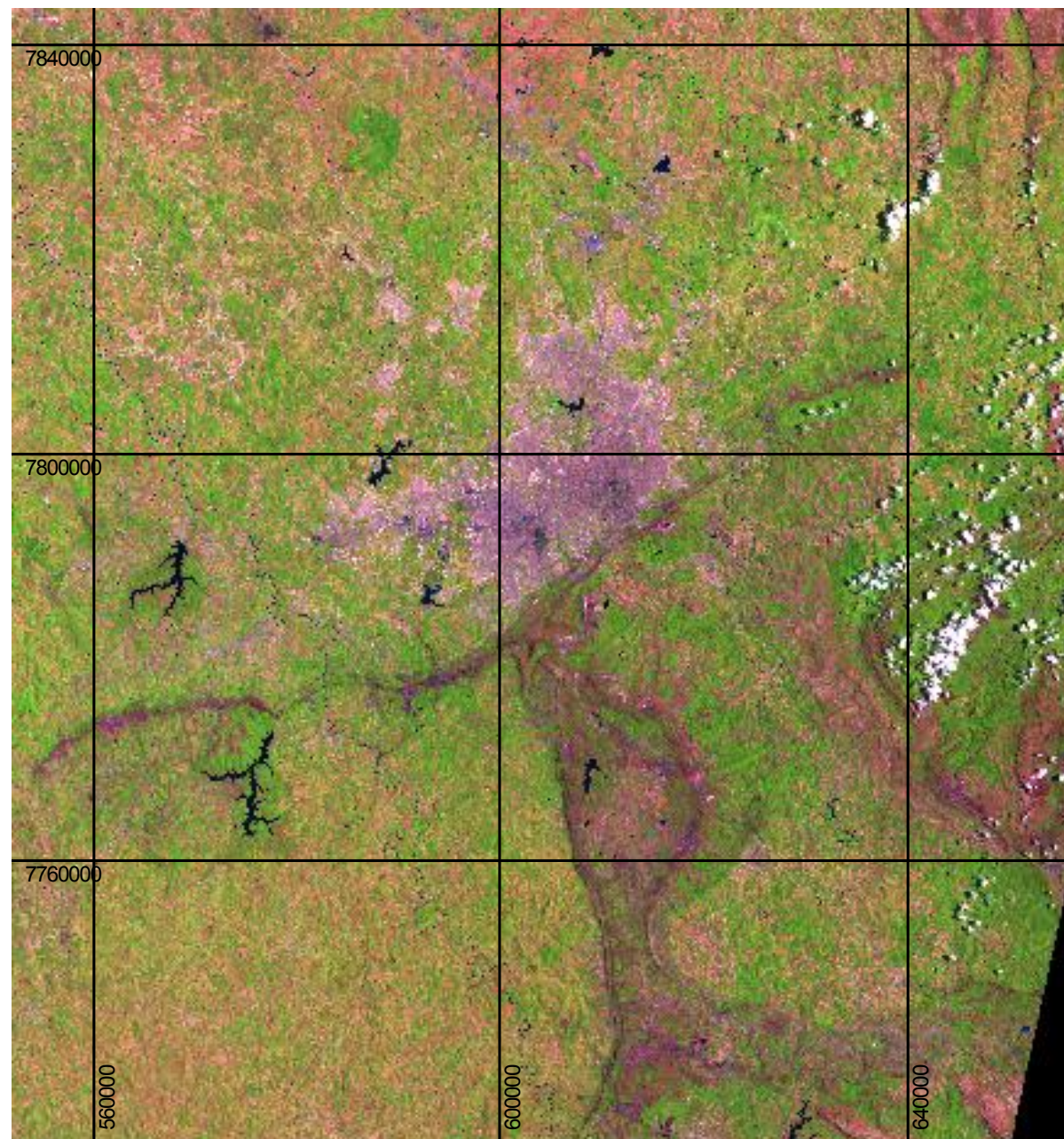
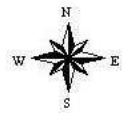
Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

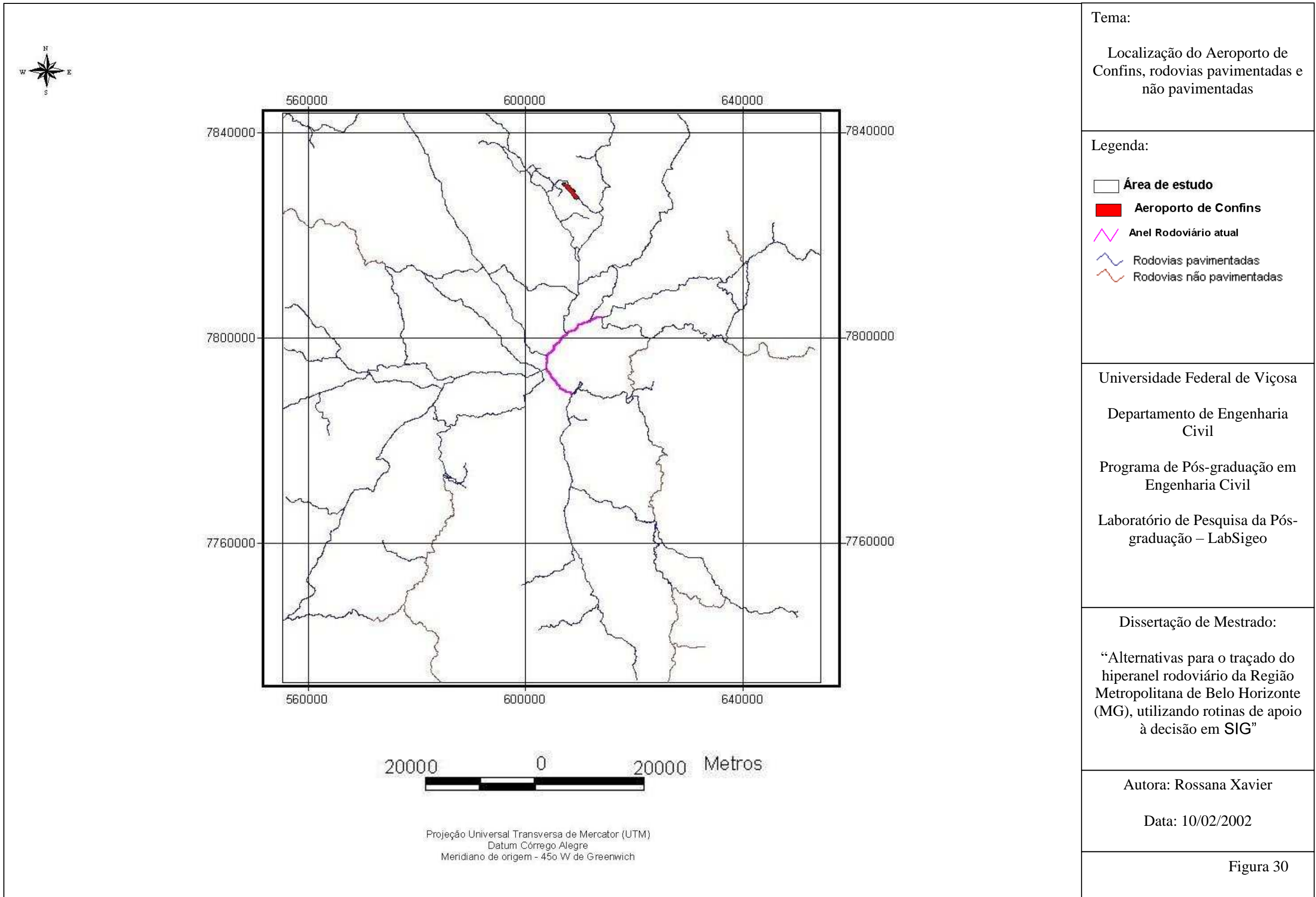
Data: 10/02/2002

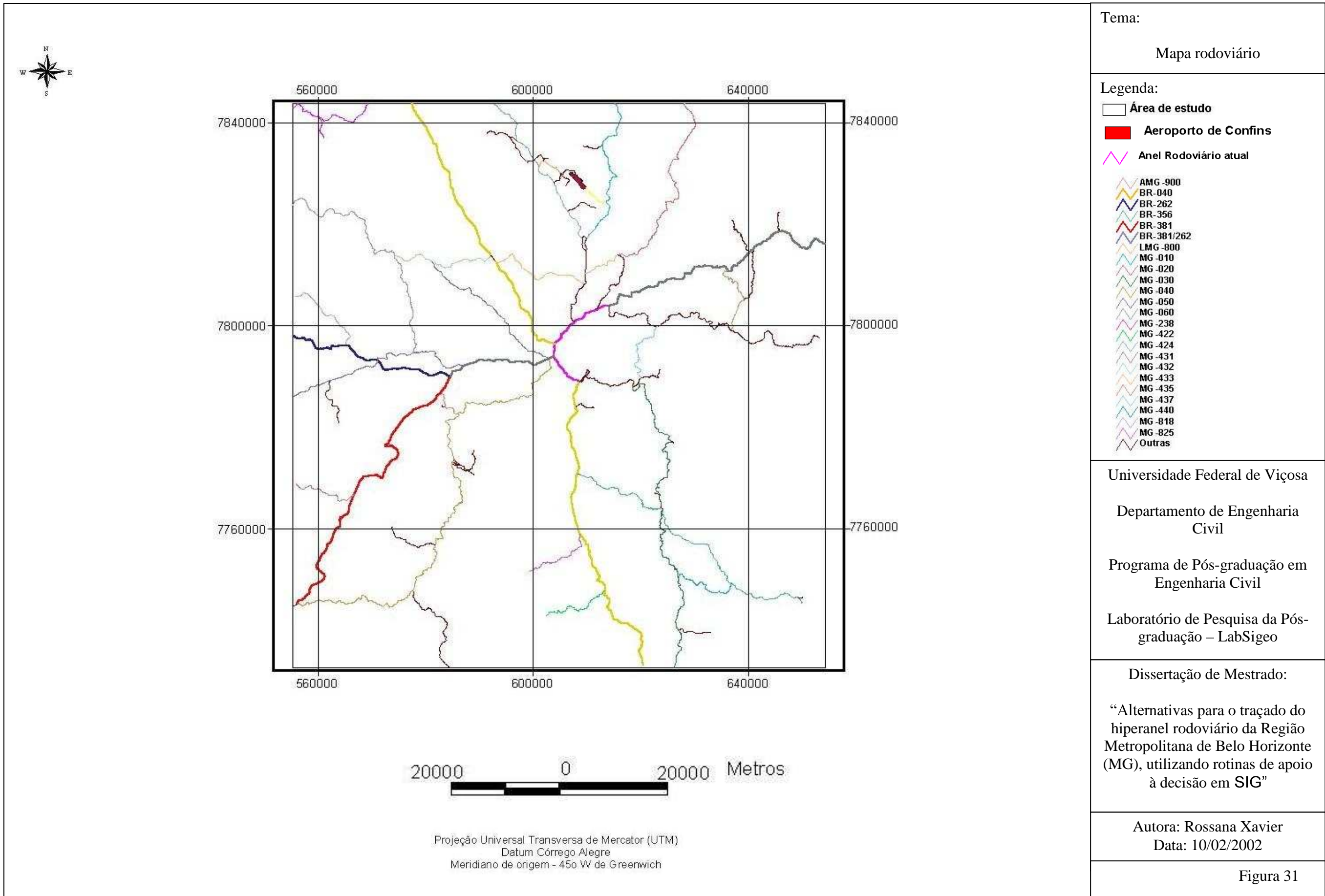
Figura 28



Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema: Imagem orbital Composição das bandas 3, 4 e 5
Universidade Federal de Viçosa Departamento de Engenharia Civil Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo
Dissertação de Mestrado: “Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”
Autora: Rossana Xavier Data: 10/02/2002
Figura 29





4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Descrição dos materiais

4.1.1. Informações analógicas e digitais

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- Levantamento plani-altimétrico cedido pelo DER-MG. Formato digital. Folhas: Cachoeira dos Macacos (1976), Pedro Leopoldo (1986), Esmeraldas (1976), Contagem (1981), Lagoa Santa (1985), Jaboticatubas (1977), Belo Horizonte (1986), Caeté (1977), Igarapé (1976), Brumadinho (1986), Itaguara (1976), Belo Vale (1976), Rio Acima (1977), Acuruí (1977), Itabirito (1985), Ouro Preto (1985).
- Mapa Rodoviário do Estado de Minas Gerais, em escala 1:1.500.000 (2000), cedido pelo DER-MG. Formatos analógico e digital.
- Mapas Rodoviários, cedidos pelo DER-MG. Formato digital. Folhas: Cachoeira dos Macacos (1976), Pedro Leopoldo (1986), Esmeraldas (1976), Contagem (1981), Lagoa Santa (1985),

Jaboticatubas (1977), Belo Horizonte (1986), Caeté (1977), Igarapé (1976), Brumadinho (1986), Itaguara (1976), Belo Vale (1976), Rio Acima (1977), Acuruí (1977), Itabirito (1985), Ouro Preto (1985).

- Mapas Hidrográficos, em escala 1:250.000 (1979), cedidos pelo Laboratório de Ensino e Pesquisa da Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – LabSigeo/PPG/EC/UFV. Formato digital. Folhas: Belo Horizonte, Divinópolis.
- Mapas Pedológicos, em escala 1:250.000 (1984), e Relatórios produzidos pelo CETEC. Formato analógico. Folhas: Belo Horizonte e Divinópolis.
- Mapa Pedológico, em escala 1:1.000.000 (1993), obtido através do site oficial do GEOMINAS. Formato digital.
- Mapas Geológicos, em escala 1:250.000 (1984), produzidos pelo CETEC. Formato analógico. Folhas: Belo Horizonte e Divinópolis.
- Mapas Geológicos, em escala 1:250.000, produzidos pela CPRM e cedidos pela CPRM/Regional de Belo Horizonte. Formato digital. Folhas: Divinópolis (2000) e BH (1977).
- Mapa Geopolítico de Divisões Administrativas do Estado de Minas Gerais – 853 municípios, em escala 1:1.500.000 (1994), obtido através do site oficial do GEOMINAS. Formato digital.
- Imagem orbital obtida pelo sensor TM (Thematic Mapper) a bordo do satélite Landsat-5 (órbita-base 218, ponto 74), nas bandas 3, 4 e 5, tomadas em outubro de 1998. Resolução = 30 metros. Cedida

pelo DER-MG. Formato digital.

- Unidade de Proposição nº 18 (UP18), parte do Relatório dos Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais integrados no município de Belo Horizonte – Projeto PBH/IGC (1994) – cedida pelo Geólogo Edézio Teixeira de Carvalho.

4.1.2. Equipamentos

Os seguintes equipamentos foram utilizados: computadores, mesas digitalizadoras, impressoras, scanner de mesa e plotter.

4.1.3. Programas

Os programas utilizados no desenvolvimento deste trabalho estão relacionados à área de Engenharia e Geoprocessamento. São eles:

- ArcView 32, © Environmental Systems Research Institute, Inc (1992-2000);
- AutoCAD 2000, © Autodesk, Inc (1982-1999);
- Cartalinx 1.2, © The Clark Labs (1998-99);
- Idrisi32, © The Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University (2001).
- MapInfo Professional 4.0.2, © MapInfo Corporation (1985-1996);
- Spring 3.5, © Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2001).

4.2. Métodos

O desenvolvimento metodológico deste trabalho constou de: coleta de dados, conversão digital das informações (quando necessário), tratamento e análise da imagem orbital, análises espaciais incluindo critérios múltiplos, concorrentes e/ou conflitantes, avaliação e proposição das soluções possíveis.

4.2.1. Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada durante visitas a órgãos e instituições federais e/ou estaduais, situados no município de Belo Horizonte (MG), tais como:

- Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM;
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER;
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais – DER/MG;
- Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural - EMATER;
- Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC;
- Companhia de Processamento de Dados do Estado de Minas Gerais - PRODEMGE.

Nesta etapa realizou-se um levantamento sistemático dos dados existentes, respectivas escalas e formatos, com o objetivo de obter as informações necessárias para a realização da análise multicritério.

Optou-se por mapas em escala de 1:250.000, devido às informações existentes e a abrangência da área de estudo.

4.2.2. Conversão digital das informações

Esta etapa foi desenvolvida no Laboratório de Ensino e Pesquisa da Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – LabSigeo/PPG/EC/UFV.

As informações em formato analógico foram convertidas ao formato digital com o uso de mesa digitalizadora e do programa Cartalinx 1.2. Foram elas: Mapas Pedológicos, em escala 1:250.000, folhas Belo Horizonte e Divinópolis, CETEC (1984); e Mapa Geológico, também em escala 1:250.000, folha Divinópolis, CETEC (1984).

A conversão do mapa geológico (folha Divinópolis) para o formato digital, foi necessária devido ao fato de que o mapeamento disponibilizado pela CPRM desta região continha novas classificações, impossibilitando a realização do mosaico para a área de estudo. Com isso, utilizou-se o mapeamento realizado pelo CETEC (1984), por conter as mesmas classificações geológicas da folha Belo Horizonte, em formato digital, disponibilizada pela CPRM, possibilitando a formação do mosaico adequadamente.

O processo de digitalização foi iniciado após prévia preparação dos mapas citados anteriormente.

O mapa pedológico em formato digital, escala 1:1.000.000, foi utilizado em pequenas regiões da área de estudo não mapeada pelo projeto do CETEC (1984), e não encontradas em escala maior.

As informações em formato digital foram verificadas uma a uma, de acordo com o tema que continham e os valores editados. Verificaram-se também, os formatos destes arquivos, realizando as conversões necessárias para compatibilização dos mesmos com o programa Idrisi 32. Após esta etapa, procedeu-se à edição das chamadas "bordas" dos mapas, ou seja, união das folhas para a formação do mosaico correspondente à área de estudo.

4.2.3. Tratamento e análise da imagem orbital

A imagem de satélite correspondente à área de estudo se encontrava em formato compatível com o programa Spring 3.5 (extensão .grb), e foi convertida para a extensão .tif, compatível com vários SIG's, inclusive o programa Idrisi 32.

As bandas disponíveis para análise e composição de outras imagens, denominadas de imagens compostas, foram 3, 4 e 5. Após a importação destas bandas no programa Idrisi 32, as mesmas foram tratadas e analisadas, para produção de um mapa temático, utilizado nas Análises Multicritérios.

4.2.3.1. Correção geométrica

Os dados obtidos de satélites (dados brutos) não se encontravam referenciados a um sistema de coordenadas terrestres e poderiam conter muitos erros que precisaram ser corrigidos antes de serem utilizados nas análises.

As bandas referentes à imagem orbital foram corrigidas geometricamente, ou seja, georeferenciadas através do módulo Resample. Ele realiza uma transformação que enquadra a imagem a um sistema particular de referência (no caso Universal Transversa de Mercator – UTM).

Foram realizadas várias tentativas de georeferenciamento com o uso de 5 arquivos de pontos de controle, em que o número de pontos variou entre 17 e 35.

O melhor georeferenciamento verificado foi o que utilizou o número de 25 pontos de controle no processo de interpolação espacial. O erro médio quadrático total (RMS total) apresentou valor dentro do limite aceitável para imagens Landsat TM5.

Os pontos de controle foram coletados a partir dos mapas digitais: hidrográfico e rodoviário.

As equações polinomiais empregadas nesta etapa da correção geométrica foram do 1º. grau (lineares), que requerem no mínimo 3 pontos de controle.

O erro médio quadrático total (RMS total) final foi de aproximadamente 0.07 pixel, ou seja, 2,10 metros ($0,07 * 30$). Uma vez que o erro médio quadrático total aceitável foi alcançado, procedeu-se ao cálculo da interpolação de intensidade.

O método de interpolação de intensidade utilizado foi o do Vizinho mais próximo. Neste caso, o valor numérico do pixel de entrada mais próximo é considerado para assiná-lo ao pixel da imagem corrigida.

4.2.3.2. Imagem composta

A composição de imagens através de várias bandas espectrais pode ser útil em muitas aplicações dos dados de sensoriamento remoto.

A imagem composta foi gerada com o uso das bandas 3, 4 e 5, correspondendo às cores do espectro eletromagnético azul, verde e vermelho, respectivamente. Esta composição de bandas fornece uma imagem cuja aparência se assemelha às cores das características dos corpos terrestres a olho nu, conforme Figura 29.

O tipo de extensão de contraste aplicado para a geração da imagem composta foi o linear com saturação dos pontos, sendo utilizado o valor de 1,0% para saturar a escala dos valores de brilho em cada uma das três bandas espectrais. Com isso, obteve-se uma imagem de melhor aparência visual, facilitando as interpretações necessárias.

Esta combinação de bandas foi empregada no processo de classificação da imagem orbital, mais propriamente na etapa de coleta das amostras de treinamento, para posterior geração de um mapa temático referente às classes de ocupação do solo na área de estudo.

4.2.3.3. Classificação da imagem orbital

A classificação supervisionada foi o método utilizado para a imagem correspondente da área de estudo.

As classes consideradas para classificação da imagem, e posterior geração de um mapa temático de uso e ocupação do solo, foram:

- Mata;
- Lagoas e/ou represas;
- Núcleos urbanos;
- Solo exposto e/ou Afloramentos de rochas;
- Solo exposto;
- Nuvens;
- Sombras; e,
- Pastagem.

Observando-se a imagem composta das bandas 3, 4 e 5 (Figura 29) para a área de estudo, verificou-se a presença de algumas nuvens e sombras cobrindo pequenas regiões, impedindo assim, a identificação correta do tipo de uso e ocupação do solo. Com isso, procedeu-se à coleta de amostras de treinamento, ou seja, coletou-se áreas específicas que representassem exemplos homogêneos destas duas feições para realização de classificação, com o objetivo de recortá-las posteriormente. Optou-se por esta alternativa para não incorrer no erro de supor quais os tipos de cobertura do solo que se encontravam nestas regiões.

A seleção e coleta das amostras de treinamento (ATs) foram realizadas com o uso de digitalização, diretamente sobre a imagem composta 345 na tela do computador.

O número de amostras de treinamento para as classes informacionais utilizadas está apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – N^o. de amostras de treinamento das classes informacionais.

Id	Classe informacional	Número de polígonos
1	Mata	45
2	Lagoas e/ou represas	12
3	Núcleos urbanos	38
4	Solo exposto e/ou Afloramentos de rochas	75
5	Solo exposto	78
6	Nuvens	10
7	Sombras	14
8	Pastagem	43

Após a coleta das amostras de treinamento para todas as classes de interesse, procedeu-se à extração e manipulação das estatísticas das mesmas (média, desvio padrão, variância, covariância e correlação).

A purificação das estatísticas, ou seja, a verificação das estatísticas para seleção das melhores amostras é necessária para tornar as amostras de treinamento mais homogêneas possíveis. Esta purificação foi realizada com o uso do método de análise do histograma, o qual deve apresentar o formato unimodal para todas as bandas e classes de interesse.

A classificação propriamente dita utilizou o algoritmo da Máxima Verossimilhança. Este algoritmo emprega a média e a covariância das amostras de treinamento para o cálculo da probabilidade estatística de um pixel desconhecido pertencer a uma classe de interesse ou a outra. Funções de densidade de probabilidade são utilizadas para realizar esta classificação. Depois de avaliar a probabilidade para cada categoria, o pixel é assinalado à classe cuja probabilidade tenha sido a mais alta, ou nenhuma delas no caso dos valores estarem abaixo de um determinado limite estipulado pelo analista.

Após a classificação da imagem, alguns cursos d'água mais visíveis na imagem de satélite e as rodovias, vetores obtidos através da digitalização sobre tela na imagem composta, foram também subtraídos do mapa temático de usos

do solo. Estas feições não foram consideradas como classes de interesse durante o processo de classificação devido à dificuldade de coleta de suas respectivas amostras de treinamento.

A necessidade de se digitalizar as rodovias deveu-se ao fato de que os mapas rodoviários empregados no processo de correção geométrica da imagem orbital apresentaram localizações diferenciadas entre as rodovias existentes na área e suas posições geográficas verificadas na imagem orbital, e também devido à pequena escala do mapa rodoviário referente ao ano 2000, em escala 1:1.500.000, inviabilizando sua aplicação neste trabalho.

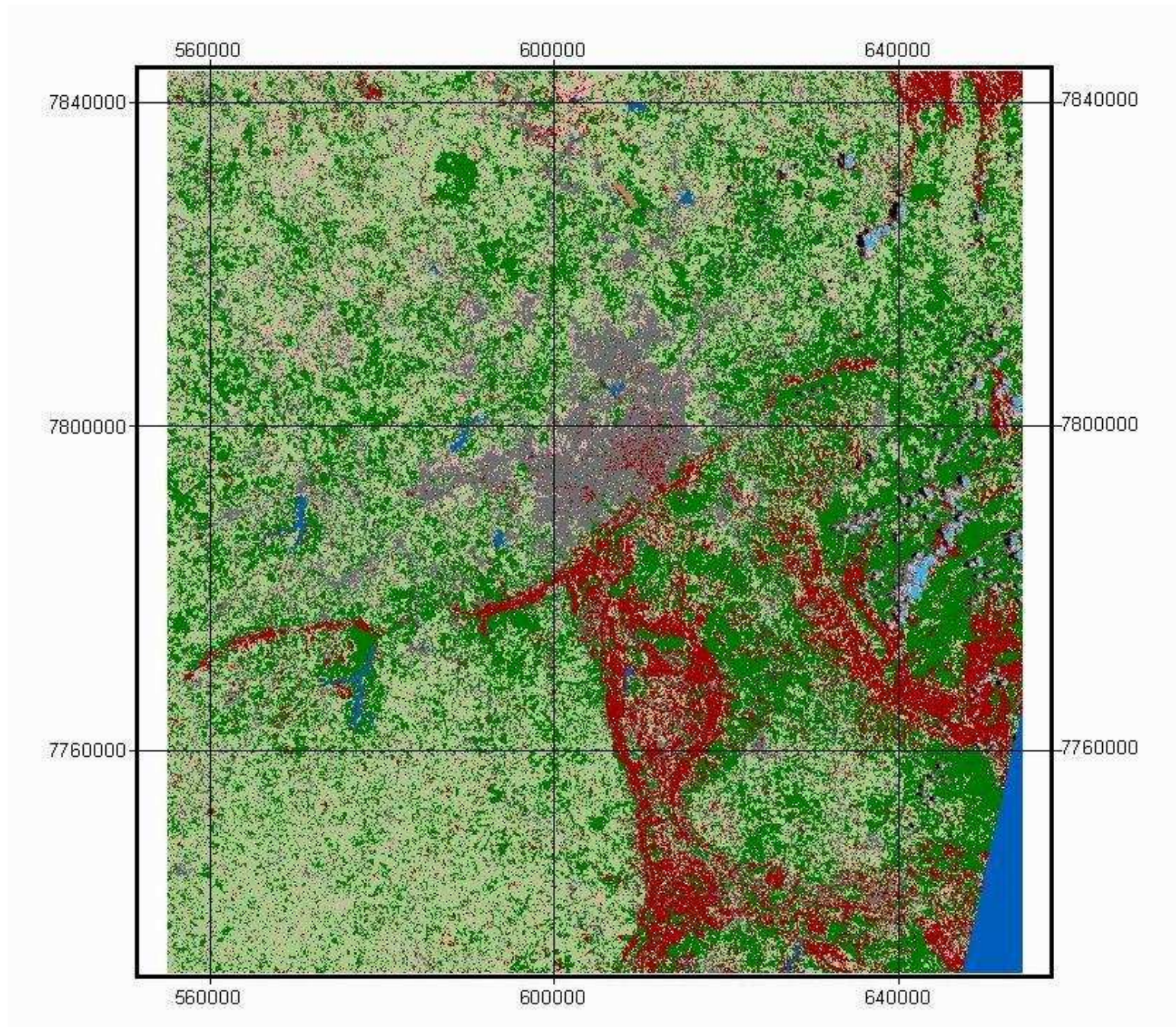
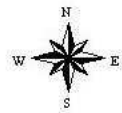
O módulo Crosstab foi utilizado para verificação das regiões de intersecção entre as outras classes e a Hidrografia (cursos d'água), Rodovias, nuvens e sombras. Este módulo realiza uma operação de combinação, ou seja, ele assume um novo identificador para cada combinação distinta das imagens de entrada.

A Figura 32 corresponde à imagem temática obtida da classificação supervisionada realizada.

4.2.4. Análises Espaciais

As Análises por Critérios Múltiplos exploraram o uso do Idrisi 32 como sistema de apoio à tomada de decisão para propor os melhores traçados para o Hiperanel Viário da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Estas análises foram utilizadas para avaliar e agregar os distintos critérios que pertencem ao conjunto de informações, geradas ou adquiridas, pertinentes à área de estudo.

Os critérios podem ser fatores ou restrições, dependendo de sua condição para definir as aptidões das regiões geográficas. Um fator acentua ou diminui a aptidão, e uma restrição limita o espaço de análise.



Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Imagem temática

Legenda:

- Mata
- Lagoa e represas
- Núcleos urbanos
- Solo exposto e afloramento de rocha
- Solo exposto
- Nuvens
- Sombras
- Pastagem
- Rios principais
- Rodovias
- Aeroporto de Confins

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:

“Análise e proposição de
alternativas de traçado para o
hiperanel da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 32

4.2.4.1. Fatores

Os fatores considerados nas análises espaciais foram divididos em quatro categorias, como segue:

- Técnicos;
- Sócio-econômico;
- Operacionais; e,
- Ambiental.

Como fatores técnicos foram considerados: as classes de declividades do terreno; as formações geológicas, considerando as mesmas como embasamento para rodovias; as estruturas geológicas, levando-se em conta suas instabilidades; e os tipos de solo, considerando suas capacidades de suporte como subleito de rodovias.

O fator sócio-econômico contemplou alguns dos tipos de uso e ocupação do solo, como as áreas de pastagem, as áreas de solo exposto, e também, áreas de solo exposto mais afloramentos de rocha junto às serras. Neste caso, os fatores relacionam-se ao custo econômico de construção do hiperanel em regiões onde existam estes tipos de uso e ocupação do solo, assim como, o aspecto social relacionado com a construção do mesmo.

Como fatores operacionais, considerou-se a capital do estado de Minas Gerais, ou seja, os limites municipais de Belo Horizonte, as rodovias e o aeroporto de Confins.

E finalmente, as áreas de mata foram consideradas como fator ambiental.

O Quadro 7 apresenta todos os fatores considerados, incluindo os seus respectivos códigos e descrições. Os códigos indicados neste quadro também representam os nomes das imagens raster dos fatores.

Quadro 7 – Fatores e respectivos códigos e descrições.

Código	Descrição
F1	Fatores técnicos
F11	Classes de declividades do terreno
F12	Tipos de formações geológicas (embasamento)
F13	Distância de estruturas geológicas (instabilidade)
F14	Estimativa da classificação HRB para os tipos de solos (subleito)
F2	Fator sócio-econômico Tipos de uso e ocupação do solo (áreas de pastagem, solo exposto e solo exposto mais afloramentos de rocha junto às serras)
F3	Fatores operacionais
F31	Distância dos limites municipais de Belo Horizonte
F32	Distância das rodovias
F33	Distância do Aeroporto de Confins
F4	Fator ambiental Tipo de uso e ocupação do solo (áreas de mata)

4.2.4.2. Restrições

As restrições consideradas nas análises espaciais foram divididas em três categorias como segue:

- Sócio-econômica;
- Operacional; e,
- Ambiental.

A restrição sócio-econômica contemplou as áreas urbanas, um dos tipos de uso e ocupação do solo, devido ao fato de não considerar a possibilidade de construção do hiperanel passando no interior dos núcleos urbanos, tanto por

restrição social relacionada com perturbações aos moradores provenientes do trânsito de veículos, e dificuldades impostas aos motoristas pela construção de saliências ou outros tipos de redutores de velocidade, quanto por restrição econômica devido ao custo de indenizações decorrentes de possíveis desapropriações de terrenos particulares.

Os limites do aeroporto de Confins foram considerados como restrição operacional para não considerar possibilidades de construção do hiperanel dentro da área ocupada pelo mesmo.

E como restrição ambiental, consideraram-se as lagoas e as represas presentes na área de estudo.

Quadro 8 – Restrições e respectivos códigos e descrições.

Código	Descrição
R2	Restrição sócio-econômica Núcleos urbanos
R3	Restrição operacional Aeroporto de confins
R4	Restrição ambiental Lagoas e/ou represas

Para melhor compreensão do processo de análise multicritério utilizado, o Quadro 9 apresenta a estrutura de fatores organizada por níveis a serem analisados.

Quadro 9 – Fatores e restrições por níveis.

1º. nível	F1	F2 R2	F3 R3	F4 R4
2º. nível	F11 F12 F13 F14		F31 F32 F33	

4.2.4.3. Cenários de avaliação

A quantidade de cenários possíveis é teoricamente infinita, considerando diferentes combinações de importâncias relativas entre os fatores e conseqüentemente diferentes pesos, assim como diversas opções de análises por combinação linear ponderada (WLC) e por combinação de média ponderada ordenada (OWA). Neste caso, optou-se por um conjunto de cenários (C) resultantes da agregação de fatores e restrições, como apresentado no fluxograma da Figura 33, considerando o objetivo de construção de novas rodovias em uma determinada área.

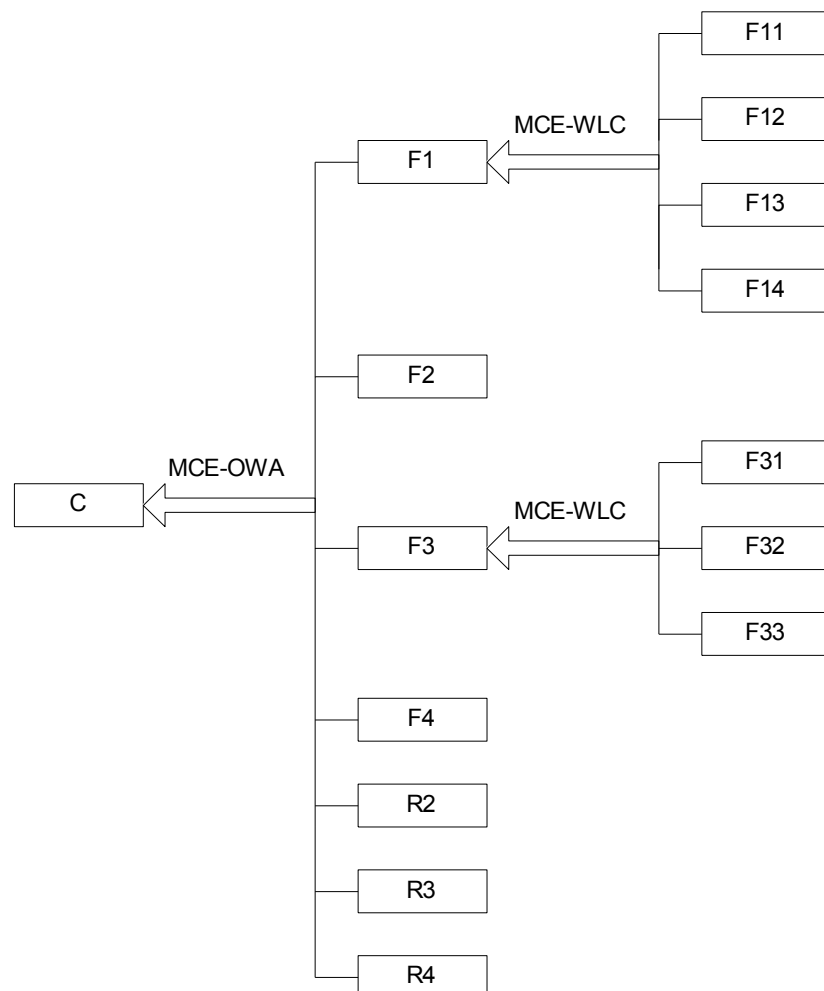


Figura 33 – Fluxograma do processo de agregação de fatores e restrições.

(Adaptado de RAMOS et al., 2001)

Assim, os fatores do 2º. nível foram agregados através do procedimento de análise multicritério por combinação linear ponderada (WLC), considerando os seus respectivos pesos.

E os fatores do 1º. nível, juntamente com as restrições, foram agregados através do procedimento de análise multicritério por combinação de média ponderada ordenada (OWA), considerando os respectivos pesos ponderados, ou pesos dos fatores, e os pesos ordenados. Estes últimos se relacionam com o ponto em que a análise foi realizada no espaço estratégico de decisão.

4.2.4.4. Descrição dos fatores considerados

As funções do conjunto fuzzy foram utilizadas para reescalar os fatores numa padronização contínua de adequabilidade em nível byte, variando de 0 a 255 níveis. Porém, alguns fatores foram reescalados categoricamente no que diz respeito a adequabilidade.

a. Fatores técnicos – F1.

a.1. Classes de declividades do terreno – F11.

Consideraram-se quatro classes de declividades do terreno para a área de estudo, sendo elas:

- Classe 1 – inclinação do terreno superior a 30%;
- Classe 2 – entre 20% e 30%;
- Classe 3 – entre 10% e 20%; e,
- Classe 4 – entre 0 e 10%.

Os intervalos de inclinações do terreno foram reescalados numa

padronização categórica, ou seja, verificou-se os identificadores de cada intervalo de declividade, e procedeu-se a uma reclassificação da imagem correspondente de acordo com as suas respectivas adequabilidades, através dos módulos Edit e Assign.

Neste sentido, as adequabilidades das classes de declividades foram adotadas considerando o relevo como condicionante básico de uma estrada em planta e perfil. Desta forma, as regiões topograficamente desfavoráveis, foram consideradas com valores menores de adequabilidades. Tem-se, então:

- Classe 1 ($i > 30\%$) – Adequabilidade 160;
- Classe 2 (20% a 30%) – Adequabilidade 200;
- Classe 3 (10% a 20%) – Adequabilidade 220;
- Classe 4 ($i < 10\%$) – Adequabilidade 255.

a.2. Tipos de formações geológicas (embasamento) – F12.

As formações geológicas foram agrupadas em sete categorias no que se refere ao suporte das mesmas como embasamento geológico para rodovias.

Neste sentido, observou-se o tipo de rocha presente em cada unidade geológica da área de estudo. Posteriormente, procedeu-se ao agrupamento daquelas unidades cujos possíveis comportamentos como embasamento geológico para construção de rodovias pudesse ser considerado como semelhante.

Observando o mapa geológico da área de estudo (Figura 25 – item 3.2.2.), o Quadro 10 apresenta um resumo das unidades geológicas e uma descrição dos tipos de rochas relacionadas a cada uma delas.

O Quadro 11 apresenta o resultado do agrupamento das unidades geológicas, uma descrição sucinta dos tipos de rochas e uma classificação dos possíveis comportamentos das mesmas como embasamento geológico.

Os comportamentos dos tipos de embasamento geológico foram reescalados numa padronização categórica, ou seja, verificou-se os

Quadro 10 – Unidades geológicas e descrição dos respectivos tipos de rochas.

Id	Sigla	Descrição
1	Qa	Aluviões: sedimentos arenosos, argilo-arenosos, localmente leitos de cascalhos
2	Qphi	Coberturas indiferenciadas: sedimentos argilo-arenosos a arenosos
3	TQd	Coberturas detríticas: sedimentos areno-argilosos a argilosos
4	Pebp	Siltitos e ardósias, argilitos, calcários e margas
5	Pebpc	Predominância de calcários, geralmente de cor cinza-escuro com laminação
6	Peei	Ortoquartzitos, quartzitos feldspáticos e micáceos, metaconglomerados, filitos
7	Peei(mv)	Rochas meta-vulcânicas de composição ácida à básica
8	Peit	Quartzitos, filitos e metaconglomerados
9	Pemp	Filito, clorita-sericita-xisto, quartzito feldspático e ferruginoso, dolomito e metaconglomerado
10	Pemi	Itabiritos com lentes de hematita compacta, com níveis micáceos e carbonáticos, dolomitos ferruginosos e filitos
11	Pemc	Quartzitos finos a grosseiros com estratificação cruzada, metaconglomerados e filitos
12	Pemi(Pemc)	Indiviso
13	Perm	Quartzitos micáceos, mica-xistos, filitos e metaconglomerados
14	Pernl	Seqüência vulcano-sedimentar: clorita-xistos, quartzo micaxisto, dolomitos, formações ferríferas, quartzitos e rochas ultrabásicas serpentinizadas
15	Pei	Gnaisses graníticos, granitóides, gnaisses bandados, migmatitos, quarto-xistos, lentes de anfibolitos e metaultrabazitos, ocorrência de rochas quartzíticas individualizadas
16	B	Rochas básicas: gabros, diabásio, anfibolitos
17	mB	Rochas ultrabásicas: piroxenitos, serpentinitos, esteatitos

Quadro 11 – Agrupamento das unidades geológicas e classificação de seus possíveis comportamentos como embasamento.

Grupo	Unidades geológicas agrupadas	Descrição das unidades geológicas	Descrição sucinta	Comportamento como embasamento
1	Qa, Qphi, TQd	Sedimentos (aluviões, coberturas detríticas e coberturas indiferenciadas)	Sedimentos	Pobre
2	Pebp, Pebpc	Siltitos, argilitos, ardósias, calcários e margas	Rochas sedimentares: clásticas e químicas	Fraco a pobre
3	Pemi	Itabiritos, dolomitos ferruginosos e filitos	Rochas metamórficas (finas)	Fraco
4	Pemp, Pemi(Pemc), Pernl	Itabiritos, dolomitos ferruginosos e filitos; Quartzitos, metaconglomerados, filitos, dolomitos e xistos; formações ferríferas e rochas ultrabásicas individualizadas	Rochas metamórficas (finas e grosseiras)	Fraco a bom
5	Peei, Peit, Pemc, Perm	Quartzitos, metaconglomerados, filitos, dolomitos e xistos (RMG e RMF)	Rochas metamórficas (grosseiras e finas)	Bom
6	Peei(mv), Pei	Rochas meta-vulcânicas de composição acida a básica; gnaisses, granitóides, xistos, dolomitos, migmatitos, lentes de anfibolitos, ocorrência de rochas quartzíticas individualizadas	Rochas: metamórficas e ígneas	Bom a excelente
7	B, mB	Gabros, diabásio, anfibolitos, piroxenitos, serpentinitos e esteatitos	Rochas ígneas	Excelente

identificadores das áreas de cada grupo, e procedeu-se a uma reclassificação da imagem correspondente de acordo com as suas respectivas adequabilidades, através dos módulos Edit e Assign.

As condições geológicas e geotécnicas podem inviabilizar determinada diretriz de uma estrada. Na maioria dos casos, são grandes os custos necessários para estabilização de cortes e aterros a serem executados em terrenos desfavoráveis (cortes em rochas, aterros sobre solos moles, etc.).

Neste sentido, as adequabilidades foram adotadas considerando a capacidade de suporte dos tipos de rochas agrupados. Desta forma, as áreas de terrenos desfavoráveis geologicamente foram consideradas com valores menores de adequabilidades. Tem-se, então:

- Grupo 1 (embasamento pobre) – Adequabilidade 50;
- Grupo 2 (embasamento pobre a fraco) – Adequabilidade 70;
- Grupo 3 (embasamento fraco) – Adequabilidade 110;
- Grupo 4 (embasamento fraco a bom) – Adequabilidade 180;
- Grupo 5 (embasamento bom) – Adequabilidade 210;
- Grupo 6 (embasamento bom a excelente) – Adequabilidade 230;
- Grupo 7 (embasamento excelente) – Adequabilidade 255;

a.3. Distância de estruturas geológicas (instabilidade) – F13.

A função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade, neste caso, foi a Linear Monotônica Crescente, pois com o aumento da distância em relação às estruturas geológicas, o valor da adequabilidade aumenta, ou seja, os locais mais afastados tornam-se cada vez mais adequados.

Neste sentido, as adequabilidades foram adotadas considerando que são elevados os custos necessários para estabilização de cortes e aterros executados em terrenos desfavoráveis, quando estas estruturas encontram-se presentes, podendo provocar instabilidade dos taludes nas marginais de

rodovias. Assim, estas regiões foram consideradas com valores menores de adequabilidades.

Considerou-se como o primeiro ponto de controle da função (a), o valor de distância mínima igual a 50 m, com a finalidade de se preservar uma faixa ao longo das estruturas geológicas, diminuindo as possibilidades de se encontrar áreas altamente adequadas nestas regiões ao final do processo de análise multicritério.

Como segundo ponto de controle da função (b), considerou-se o valor de 3000 m. Desta forma, manteve-se uma distância razoavelmente adequada do ponto de vista técnico e econômico, em relação às estruturas geológicas, para construção de rodovias.

A Figura 34 mostra o gráfico representativo da função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade do fator distância em relação às estruturas geológicas.

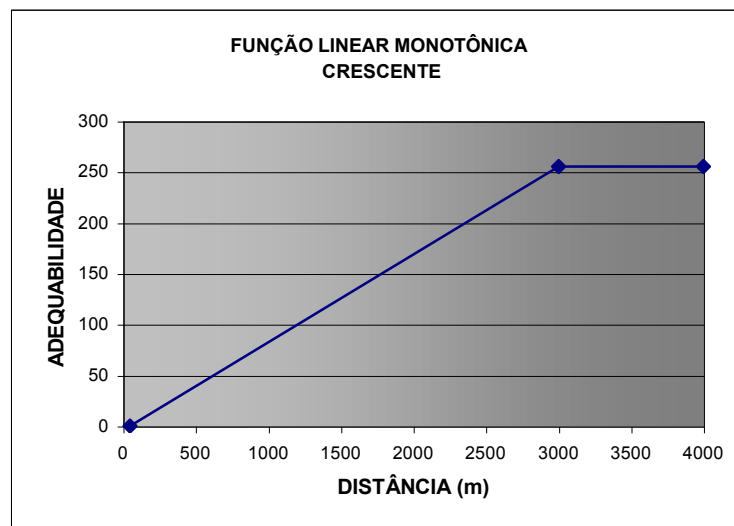


Figura 34 – Gráfico representativo da padronização do fator distância das estruturas geológicas. Distância máxima = 60.456 m.

Para realizar esta padronização, procedeu-se à geração de imagens relacionadas com a distância das localizações às estruturas geológicas, através

do módulo Distance. Esse módulo produz uma superfície contínua de valores da distância Euclidiana da característica que se deseja, com valores medidos em metros, neste caso.

a.4. Estimativa da classificação HRB para os tipos de solos (subleito) – F4.

Os tipos de solos foram classificados de acordo com as porcentagens dos materiais constituintes dos mesmos (areia grossa, areia fina, silte e argila), presentes no Relatório do Levantamento Pedológico – CETEC (1984), com vistas aos resultados obtidos dos materiais coletados e analisados em laboratório referentes aos horizontes B ou C, cujas profundidades variaram entre 40 cm a 200 cm.

Considerou-se a Classificação HRB para nomear o comportamento dos solos para possível utilização como subleito de rodovias. O subleito é o material de fundação, sobre o qual apóia-se o pavimento da rodovia.

Após a classificação dos solos, eles foram reescalados numa padronização categórica, ou seja, verificou-se os identificadores de cada região com determinada estimativa da classificação HRB e procedeu-se a uma reclassificação da imagem correspondente, de acordo com as adequabilidades dos mesmos, através do uso dos módulos Edit e Assign.

Assim, foram consideradas as possíveis características geotécnicas dos tipos de solos presentes da área de estudo, para a atribuição dos valores de adequabilidade dos mesmos. Do ponto de vista das terminologias da classificação HRB, as adequabilidades no que se refere ao comportamento como subleito dos solos, foram consideradas como segue:

- Solos rasos (SR) – Adequabilidade 50;
- Solos de comportamento pobre a fraco, mais presença de solos rasos (SR) – Adequabilidade 70;
- Solos de comportamento pobre a fraco, mais presença de solos rasos (SR) e afloramentos de rochas (AR) – Adequabilidade 80;

- Solos de comportamento pobre a fraco – Adequabilidade 90;
- Solos rasos (SR) e afloramentos de rochas (AR) – Adequabilidade 120;
- Solos de comportamento pobre a excelente – Adequabilidade 150;
- Solos de comportamento pobre a excelente, mais presença de afloramentos de rochas – Adequabilidade 170;
- Afloramentos de rochas – Adequabilidade 190;
- Solos de comportamento bom a excelente – Adequabilidade 230.

A Figura 35 mostra as representações, ou seja, os mapas referentes aos fatores técnicos F11, F12, F13 e F14.

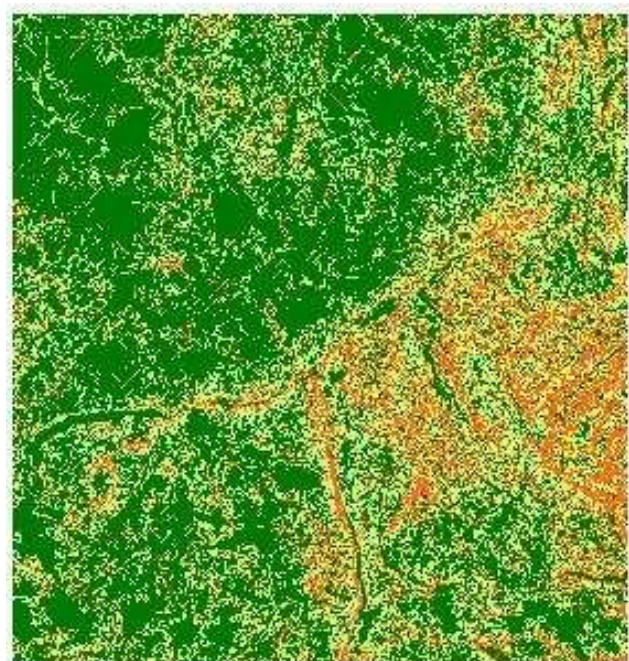
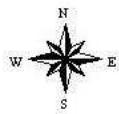
b. Fator sócio-econômico – F2.

Os tipos de uso e ocupação do solo considerados como fator sócio-econômico foram as áreas de pastagem, áreas de solo exposto, e áreas de solo exposto mais afloramentos de rocha junto às serras.

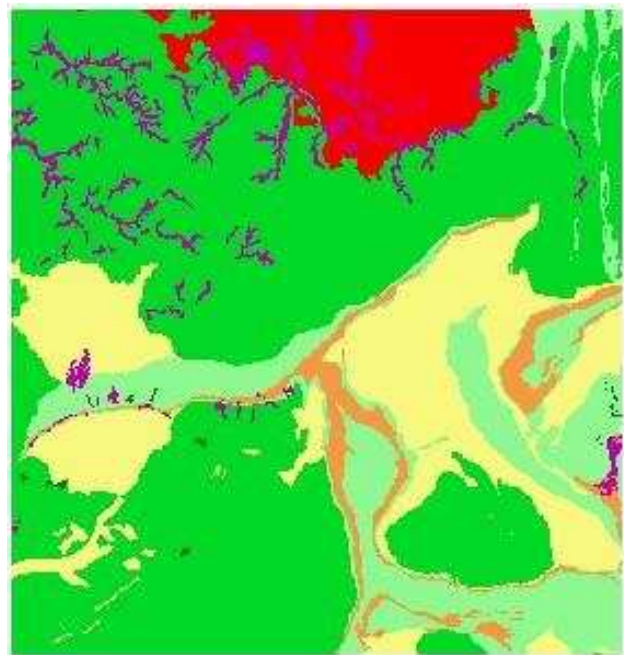
Estas regiões foram reescaladas numa padronização categórica, ou seja, verificou-se os identificadores de cada uma delas, e procedeu-se a uma reclassificação da imagem correspondente, de acordo com as suas respectivas adequabilidades, através dos módulos Edit e Assign.

Neste sentido, as adequabilidades dos tipos de uso e ocupação do solo foram adotadas considerando os mesmos como fatores relacionados à sociedade e aos custos de construção de rodovias. Desta forma, as regiões socialmente e economicamente desfavoráveis, foram consideradas com valores menores de adequabilidades. Tem-se, então:

- Áreas de solo exposto – Adequabilidade 160;
- Áreas de solo exposto mais afloramentos de rochas – Adequabilidade 190;



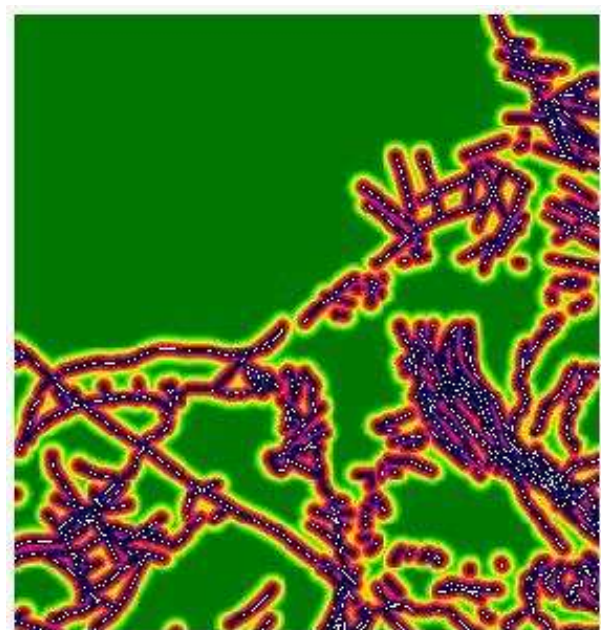
- > 30 % (160)
- 20 a 30 % (200)
- 10 a 20 % (220)
- 0 a 10% (255)



- Pobre - sedimentos (50)
- Fraco a pobre - rochas sedimentares (70)
- Fraco - rochas metamórficas finas (110)
- Fraco a bom - rochas metamórficas finas e grosseiras (180)
- Bom - rochas metamórficas grosseiras e finas (210)
- Bom a excelente - rochas metamórficas e ígneas (230)
- Excelente - rochas ígneas (255)

Fator F11

Fator F12



- 0.00
- 15.94
- 31.88
- 47.81
- 63.75
- 79.69
- 95.63
- 111.56
- 127.50
- 143.44
- 159.38
- 175.31
- 191.25
- 207.19
- 223.13
- 239.06
- 255.00



- Solos rasos (50)
- Pobre a fraco e solos rasos (70)
- Pobre a fraco, solos rasos e aflor. rochas (80)
- Pobre a fraco (90)
- Solos rasos e aflor. rochas (120)
- Pobre a excelente (150)
- Pobre a excelente e aflor. rochas (170)
- Aflor. rochas (190)
- Bom a excelente (230)

Fator F13

Fator F14

Temas:

Fatores técnicos

Fator F11 – Classes de declividades

Fator F12 – Formações geológicas (embasamento)

Fator F13 – Distância das estruturas geológicas (instabilidade)

Fator F14 – Classificação “aproximada” HRB (subleito)

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 35

- Áreas de pastagem – Adequabilidade 230;

A Figura 36 apresenta o mapa correspondente ao fator sócio-econômico F2 para a área de estudo.

c. Fatores operacionais– F3.

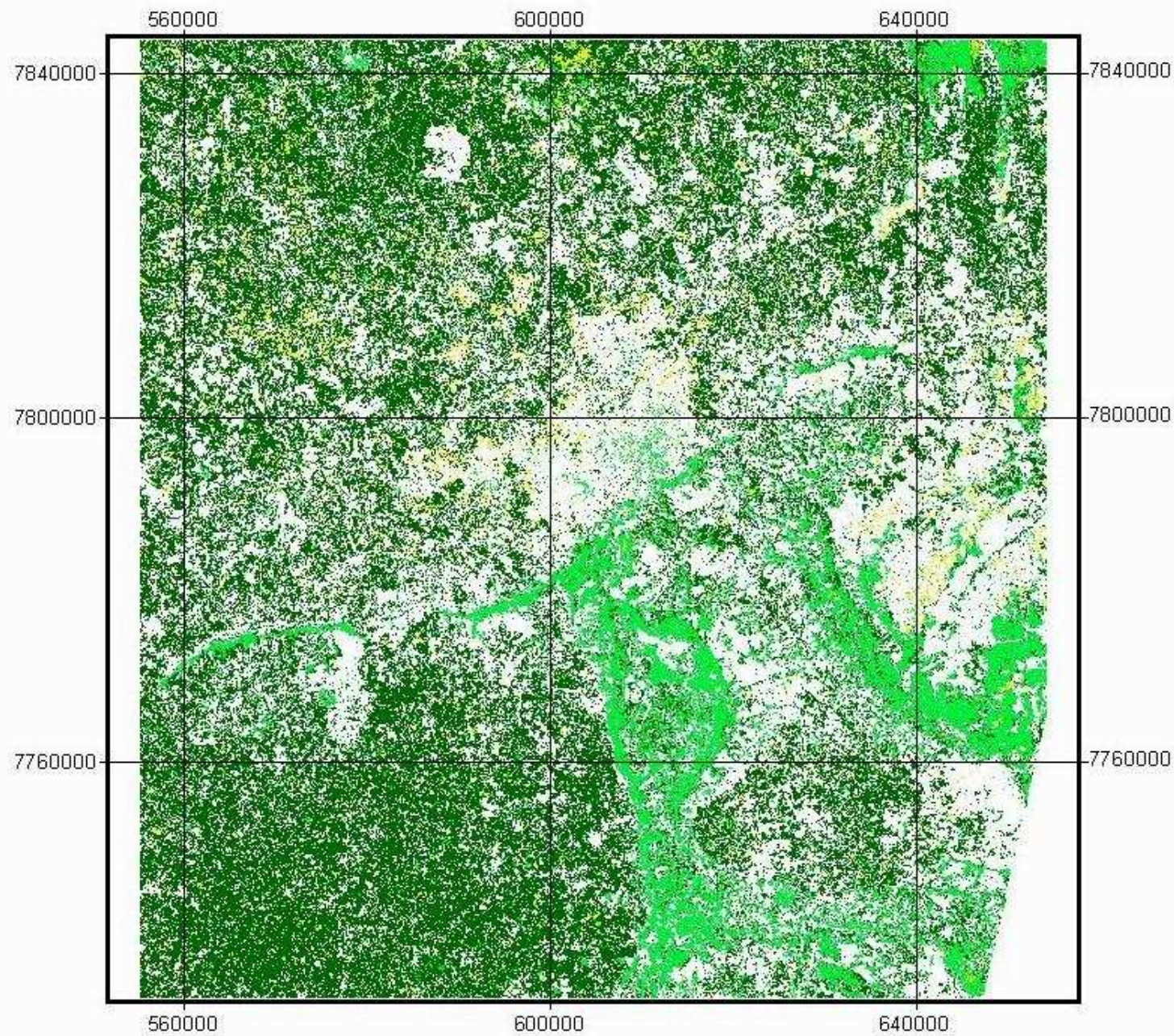
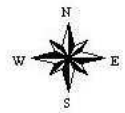
c.1. Distância dos limites municipais de Belo Horizonte – F31.

A função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade, neste caso, foi a Linear Monotônica Decrescente, pois com o aumento da distância em relação aos limites municipais de Belo Horizonte, o valor da adequabilidade diminui, ou seja, os locais mais afastados tornam-se cada vez menos adequados.

Neste sentido, as adequabilidades foram adotadas considerando a importância do hiperanel estar relativamente próximo ao município de Belo Horizonte no que diz respeito à sua operacionalidade. Assim, as regiões mais próximas deste município foram consideradas com valores maiores de adequabilidades.

Como primeiro ponto de controle da função (c), considerou-se o valor de distância mínima igual a 0. E como segundo ponto de controle da função (d), considerou-se o valor de 50.000 m. Desta forma, objetivou-se encontrar regiões mais próximas do município de Belo Horizonte com adequabilidades superiores àquelas de regiões mais distantes do mesmo, observando que a partir de 50 km, as adequabilidades são nulas.

A Figura 37 mostra o gráfico representativo da função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade do fator distância dos limites municipais de Belo Horizonte.



20000 0 20000 Metros

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema: Fator sócio-econômico
Legenda: Usos e ocupações do solo (Adequabilidade) Solo exposto (160) Solo exposto e aflor. rochas (190) Pastagem (230)
Universidade Federal de Viçosa Departamento de Engenharia Civil Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo
Dissertação de Mestrado: “Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”
Autora: Rossana Xavier Data: 10/02/2002
Figura 36

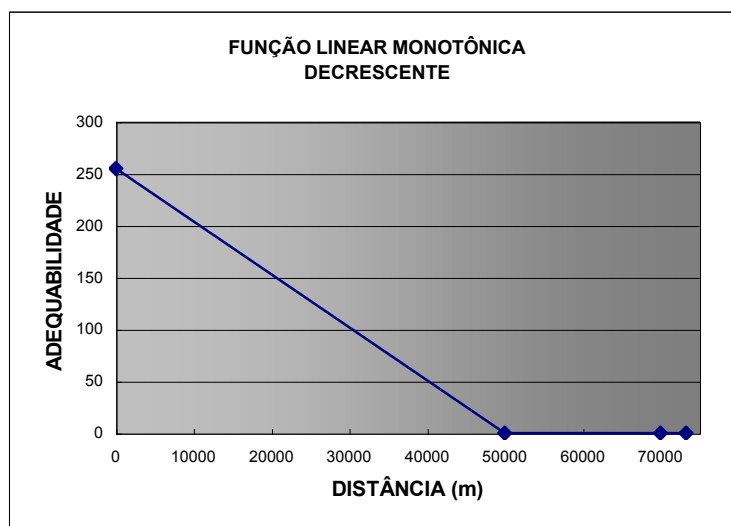


Figura 37 – Gráfico representativo da padronização do fator distância dos limites municipais de Belo Horizonte.

Distância máxima = 73.283 m.

Para realização desta padronização, procedeu-se à geração de imagens relacionadas com a distância das localizações à capital mineira, através do módulo Distance. Esse módulo produz uma superfície contínua de valores da distância Euclidiana da característica que se deseja, com valores medidos em metros, neste caso.

c.2. Distância das rodovias – F32.

A função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade, neste caso, foi a Sigmoidal Simétrica, pois com o aumento da distância em relação às rodovias, o valor da adequabilidade aumenta, ou seja, os locais mais afastados tornam-se cada vez mais adequados. Isso se deve ao fato de que a construção de nova rodovia, caso do hiperanel, mantivesse distância razoável das rodovias existentes.

Porém, para determinados acréscimos na distância em relação às rodovias, o valor da adequabilidade permanece constante, ou seja, considerou-

se a existência de um intervalo em que os locais são igualmente adequados.

Para maiores acréscimos na distância, o valor da adequabilidade diminui, ou seja, os locais mais afastados tornam-se cada vez menos adequados devido ao fato de aumentar os acessos através das rodovias existentes ao hiperanel.

Neste sentido, as adequabilidades foram adotadas considerando a importância do hiperanel estar relativamente próximo ao município de Belo Horizonte no que diz respeito à sua operacionalidade. Assim, as regiões mais próximas deste município foram consideradas com valores maiores de adequabilidades.

Considerou-se como o primeiro ponto de controle da função (a), o valor de distância mínima igual a 5.000 m. Como segundo e terceiro pontos de controle da função (b) e (c), os valores de distância iguais a 10.000 m e 15.000 m. E como quarto ponto de controle (d), considerou-se o valor de 20.000 m. A partir desta distância, os custos de construção de vias de acesso ao hiperanel proposto neste trabalho aumentariam consideravelmente.

A Figura 38 mostra o gráfico representativo da função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade do fator distância das rodovias.

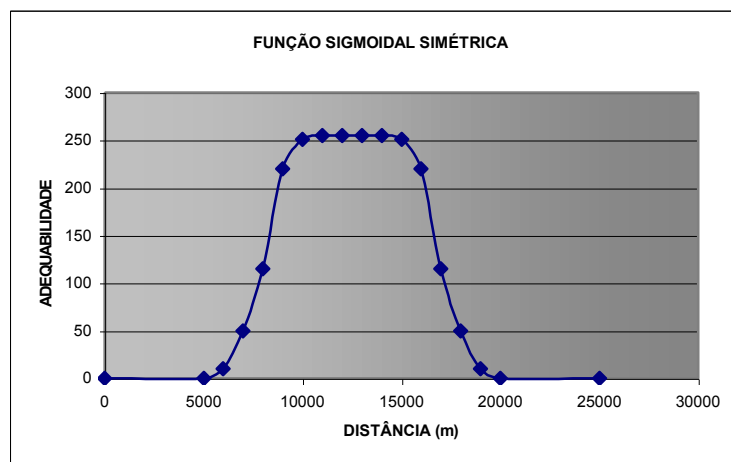


Figura 38 – Gráfico representativo da padronização do fator distância das rodovias. Distância máxima = 25.209 m.

Para realização desta padronização, procedeu-se à geração de imagens relacionadas com a distância das localizações às rodovias, através do módulo Distance. Esse módulo produz uma superfície contínua de valores da distância Euclidiana da característica que se deseja, com valores medidos em metros, neste caso.

c.3. Distância do aeroporto de Confins – F33.

A função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade, neste caso, foi a Sigmoidal Monotônica Decrescente, pois com o aumento da distância em relação ao aeroporto de Confins, o valor da adequabilidade diminui, ou seja, os locais mais afastados tornam-se cada vez menos adequados. Isso se deve ao fato de que a construção de nova rodovia, caso do hiperanel, estivesse a mais próxima possível do aeroporto para facilitar o acesso ao mesmo.

Neste sentido, as adequabilidades foram adotadas considerando a importância do hiperanel estar o mais próximo possível do aeroporto de Confins no que diz respeito à sua operacionalidade. Assim, as regiões mais próximas do mesmo foram consideradas com valores maiores de adequabilidades.

Como primeiro ponto de controle da função (c), considerou-se o valor de distância mínima igual a 0. E como segundo ponto de controle da função (d), considerou-se o valor de 50.000 m. Desta forma, a partir de 50 km, as adequabilidades são nulas.

A Figura 39 mostra o gráfico representativo da função fuzzy utilizada para a padronização contínua de adequabilidade do fator distância do Aeroporto de Confins.

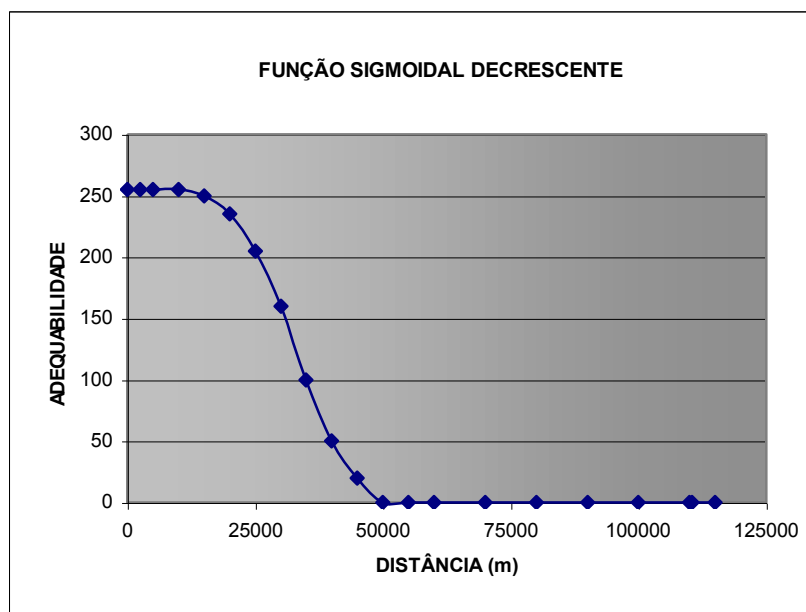


Figura 39 – Gráfico representativo da padronização do fator distância do Aeroporto de Confins. Distância máxima = 110.459 m.

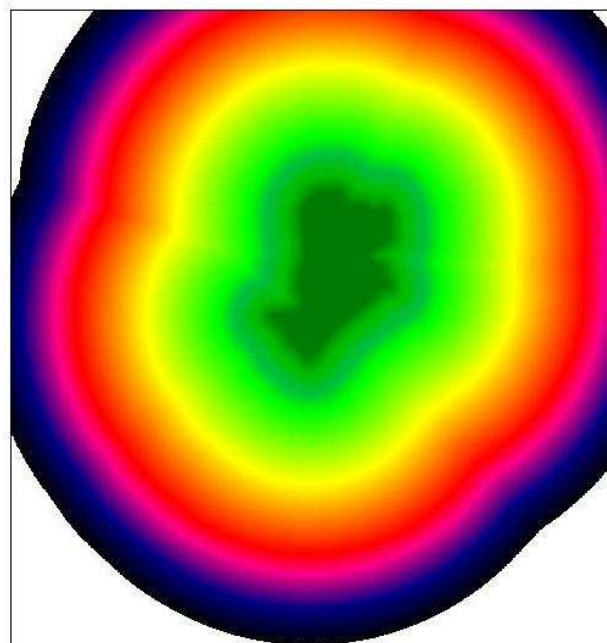
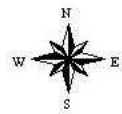
Para realização desta padronização, procedeu-se à geração de imagens relacionadas com a distância das localizações aeroporto, através do módulo Distance. Esse módulo produz uma superfície contínua de valores da distância Euclidiana da característica que se deseja, com valores medidos em metros, neste caso.

A Figura 40 mostra os mapas correspondentes aos fatores operacionais F31, F32 e F33.

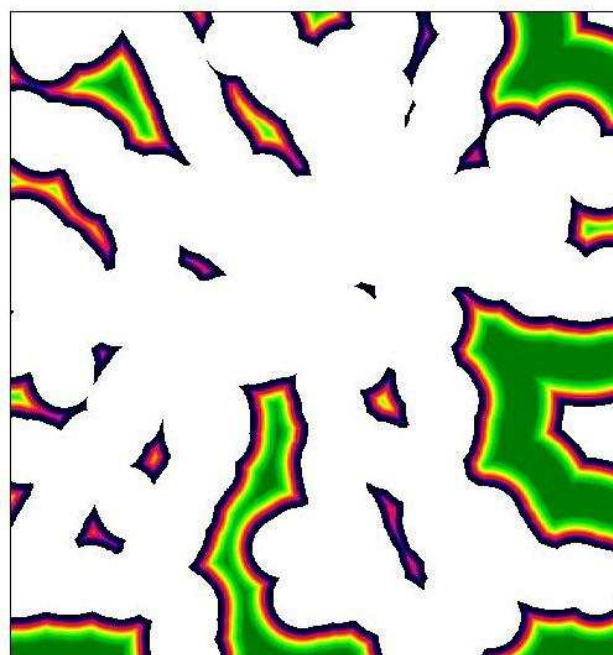
d. Fator ambiental – F4.

O tipo de uso e ocupação do solo considerado como fator ambiental (Figura 41) foi a mata.

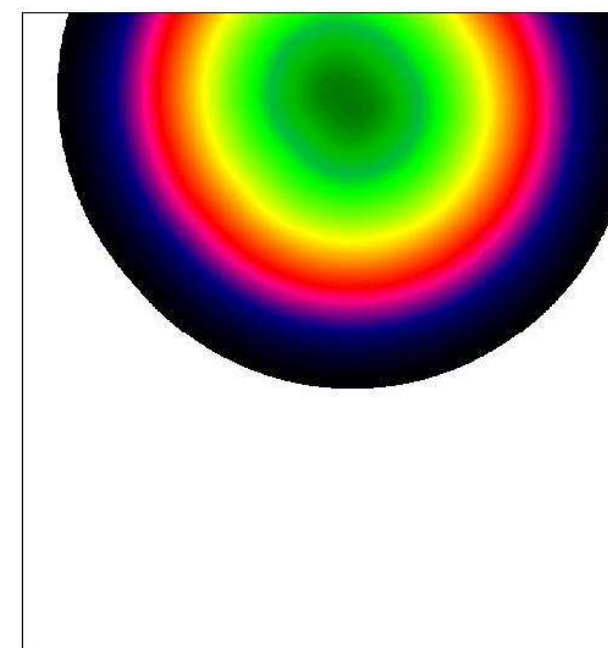
As regiões onde se encontrava este tipo de cobertura vegetal foram reescaladas numa padronização categórica, ou seja, verificou-se o



Fator F31

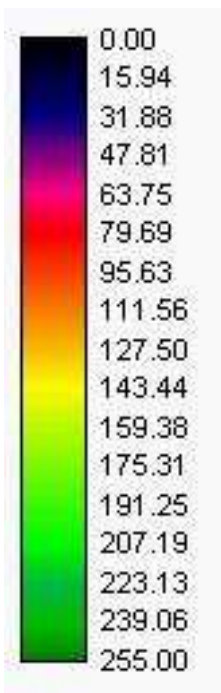


Fator F32



Fator F33

Adequabilidade



□ Área de estudo

Tema:

Fatores operacionais

Fator F31 – Distância dos limites municipais de BH

Fator F32 – Distância das rodovias

Fator F33 – Distância do Aeroporto de Confins

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 40

identificador e procedeu-se a uma reclassificação da imagem correspondente, de acordo com a sua respectiva adequabilidade, através do módulo Reclass.

Neste sentido, a adequabilidade das regiões de mata foi adotada considerando a sua baixa adequabilidade para construção do hiperanel, diminuindo as possibilidades de se encontrar áreas altamente adequadas ao final do processo de análise multicritério. Desta forma, estas regiões, ambientalmente desfavoráveis, foram consideradas com valor de adequabilidade igual a 100.

4.2.4.5. Descrição das restrições consideradas

As restrições consideradas foram necessárias para excluir completamente as localizações na área de estudo que não poderiam ser encontradas para a possível construção do hiperanel rodoviário da RMBH.

Com este objetivo, verificou-se os identificadores de cada uma das regiões referentes às respectivas restrições, e procedeu-se a uma reclassificação das imagens correspondentes, através do módulo Reclass. Tem-se, então:

a. Restrição sócio-econômica – R2.

Áreas de núcleos urbanos – Adequabilidade 0;

b. Restrição operacional – R3.

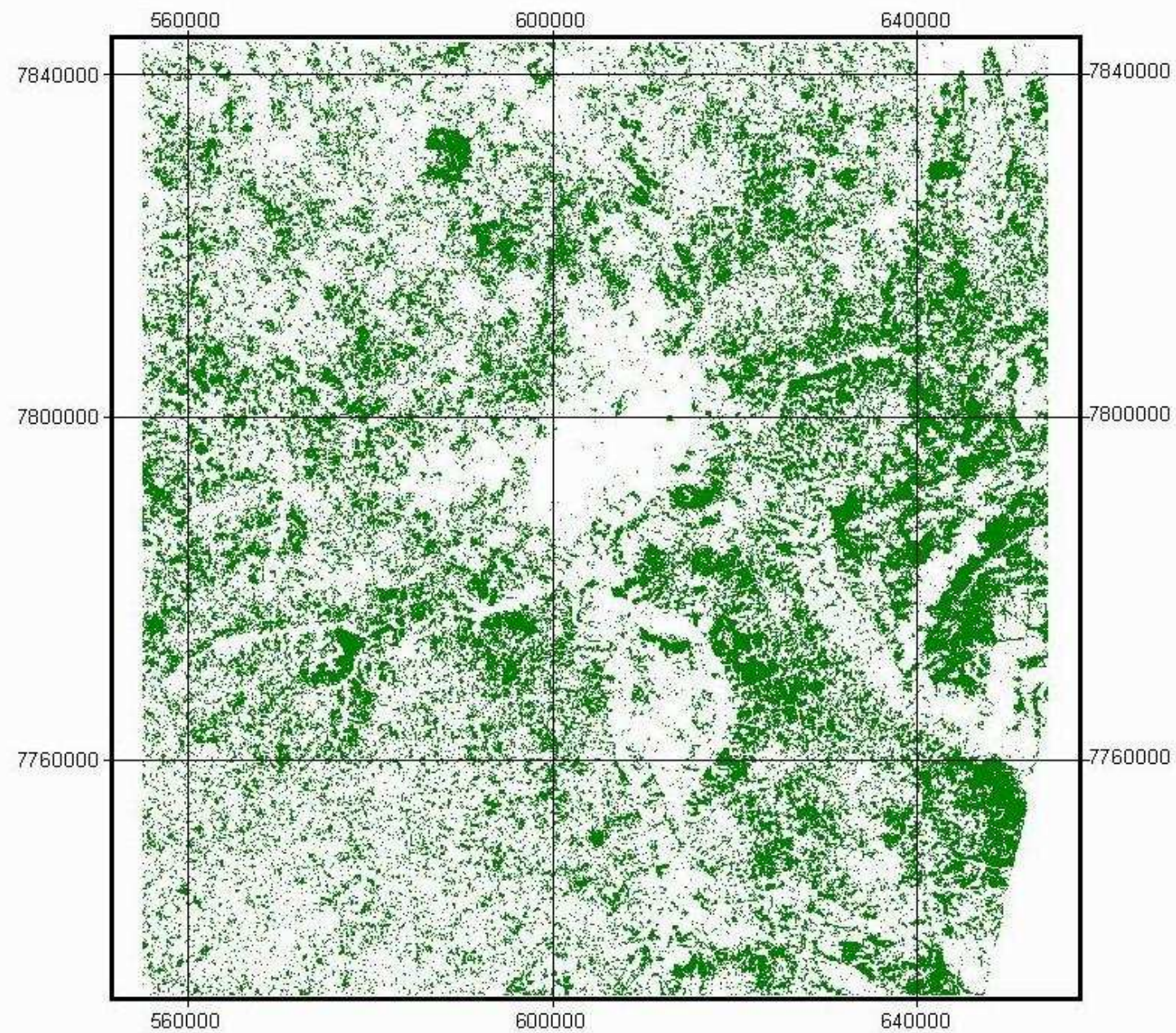
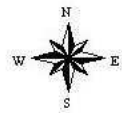
Área do aeroporto de Confins – Adequabilidade 0;

c. Restrição ambiental – R4.

Áreas de lagoas e/ou represas – Adequabilidade 0;

4.2.4.6. Agregação dos fatores do 2º. nível

Os fatores do 2º. nível foram agregados através do procedimento de análise multicritério por combinação linear ponderada (WLC), considerando



Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Fator ambiental

Legenda:

Uso e ocupação do solo

(Adequabilidade)

 Mata (100)

Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 41

os seus respectivos pesos.

Através deste procedimento, cada fator é multiplicado pelo seu respectivo peso, eles são somados e a soma é dividida pelo número de fatores. A média ponderada é calculada para cada pixel da imagem.

Esta técnica permite colocar a análise exatamente entre o AND (mínimo ou aversão ao risco) e o OR (máximo ou risco extremo), ou seja, o nível de risco assumido na análise é médio e o grau de compensação entre os fatores é total.

Para a agregação dos fatores, procede-se anteriormente à valoração relativa entre eles com o uso do módulo Weight do programa Idrisi 32. Este módulo utiliza uma técnica de comparação de pares de fatores para desenvolver um conjunto de pesos ponderados cuja somatória é igual a um (1). Os fatores são comparados 2 a 2 em termos de sua importância relativa.

a. Agregação dos fatores técnicos

Os fatores técnicos (Classes de declividades do terreno – F11, Tipos de formações geológicas – F12, Distância de estruturas geológicas – F13, e Estimativa da classificação HRB para os tipos de solos – F14) foram agregados após atribuição de suas importâncias relativas, e conseqüente cálculo dos pesos ponderados.

O Quadro 12 apresenta a distribuição das importâncias relativas consideradas para estes fatores, objetivando a construção do hiperanel.

Quadro 12 – Importâncias relativas entre os fatores técnicos.

Fatores	F11	F12	F13	F14
F11	1	-	-	-
F12	1/5	1	-	-
F13	1/5	1	1	-
F14	1/5	1/3	1/3	1

Descrição das importâncias relativas atribuídas:

- **F12 – F11: 1/5**

Considerou-se a importância relativa dos tipos de formações geológicas como **fortemente menos importante** que a das classes de declividades do terreno, devido ao fato do relevo ser o condicionante básico para construção de rodovias.

- **F13 – F11: 1/5**

Considerou-se a importância da distância de estruturas geológicas como **fortemente menos importante** que a das classes de declividades do terreno, devido ao fato do relevo ser o condicionante básico para construção de rodovias.

- **F14 – F11: 1/5**

Considerou-se a importância relativa da estimativa da classificação HRB para os tipos de solos como **fortemente menos importante** que a das classes de declividades do terreno, devido ao fato do relevo ser o condicionante básico para construção de rodovias.

- **F13 – F12: 1**

Considerou-se a importância relativa da distância de estruturas geológicas como **igualmente importante** que a dos tipos de formações geológicas, devido ao fato de serem características de mesma natureza – geológica.

- **F14 – F12: 1/3**

Considerou-se a importância relativa da estimativa da classificação HRB para os tipos de solos como **moderadamente menos importante** que a dos tipos de formações geológicas, devido ao fato dos últimos estarem relacionados ao embasamento das rodovias e a

classificação utilizada ser apenas uma estimativa.

- **F14 – F13: 1/3**

Considerou-se a importância relativa da estimativa da classificação HRB para os tipos de solos como **moderadamente menos importante** em relação à distância de estruturas geológicas, pelo fato da última estar relacionada às possíveis instabilidades dos taludes de corte e aterro presentes nas marginais das rodovias e a classificação utilizada ser apenas uma estimativa.

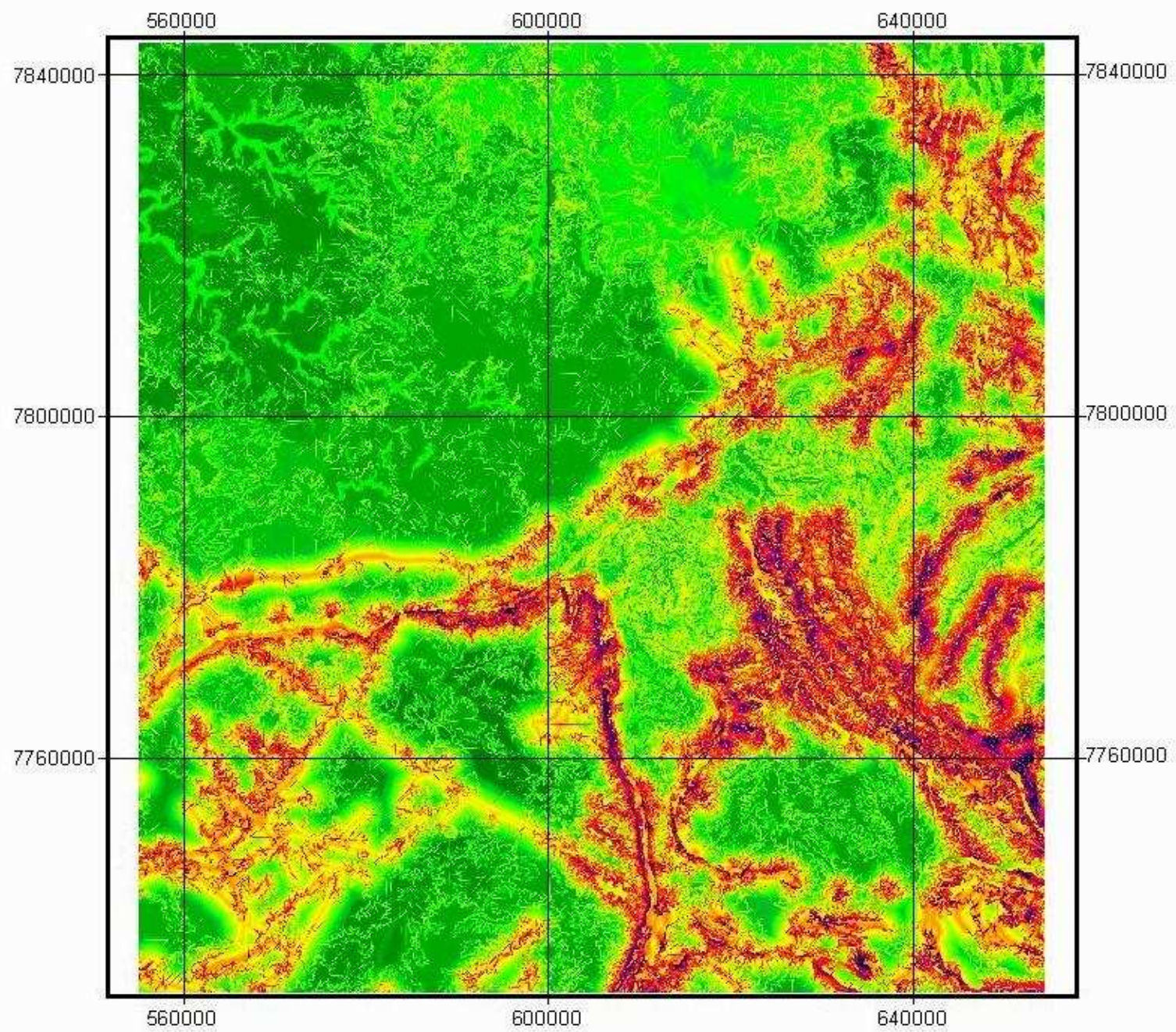
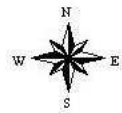
O resultado do cálculo dos pesos ponderados, ou pesos dos fatores, mostra a relação entre os fatores técnicos no processo de agregação dos mesmos visando à construção do hiperanel proposto neste trabalho. São eles:

- Peso ponderado do fator F11 – 0,5000;
- Peso ponderado do fator F12 – 0,1667;
- Peso ponderado do fator F13 – 0,1667; e,
- Peso ponderado do fator F14 – 0,1667.

Após o cálculo destes pesos, observou-se o valor da razão de consistência (CR – consistency ratio) que foi igual a zero. Isto indica que a matriz de categorias foi gerada adequadamente, pois valores de CR inferiores a 0,10 não necessitam de reavaliação.

O procedimento de análise multicritério combinação linear ponderada (WLC) foi utilizado para o cálculo da média ponderada para cada pixel da imagem.

O resultado final é apresentado na Figura 42, imagem denominada de F1, ou seja, trata-se dos fatores técnicos agregados em uma mesma imagem.



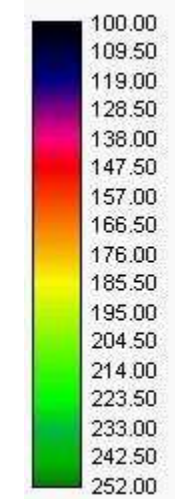
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Fator técnico

Legenda:

Adequabilidade



Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 42

b. Agregação dos fatores operacionais

Os fatores operacionais (Distância dos limites municipais de Belo Horizonte – F31, Distância das rodovias – F32, e Distância do aeroporto de Confins – F33) foram agregados após atribuição de suas importâncias relativas, e conseqüente cálculo dos pesos ponderados.

O Quadro 13 apresenta a distribuição das importâncias relativas consideradas para estes fatores, objetivando a construção do hiperanel.

Quadro 13 – Importâncias relativas entre os fatores operacionais.

Fatores	F31	F32	F33
F31	1	-	-
F32	1/3	1	-
F33	1	3	1

Descrição das importâncias relativas atribuídas:

- **F32 – F31: 1/3**

Considerou-se a importância relativa da distância das rodovias como **moderadamente menos importante** à distância dos limites municipais de Belo Horizonte, devido ao fato de se priorizar mais a construção do hiperanel próximo da capital mineira.

- **F33 – F31: 1**

Considerou-se a importância relativa da distância do aeroporto de Confins como **igualmente importante** à distância dos limites municipais de Belo Horizonte, devido se tratarem de fatores de mesma característica do ponto de vista operacional para o hiperanel, tanto próximo à capital mineira, quanto próximo ao aeroporto de

Confins para sua melhor utilização.

- **F33 – F32: 3**

Considerou-se a importância relativa da distância do aeroporto de Confins como **moderadamente mais importante** à distância das rodovias, devido ao fato de ser priorizar mais a construção do hiperanel nas proximidades do aeroporto para sua melhor utilização.

O resultado do cálculo dos pesos ponderados, ou pesos dos fatores, mostra a relação entre os fatores operacionais no processo de agregação dos mesmos visando à construção do hiperanel proposto neste trabalho. São eles:

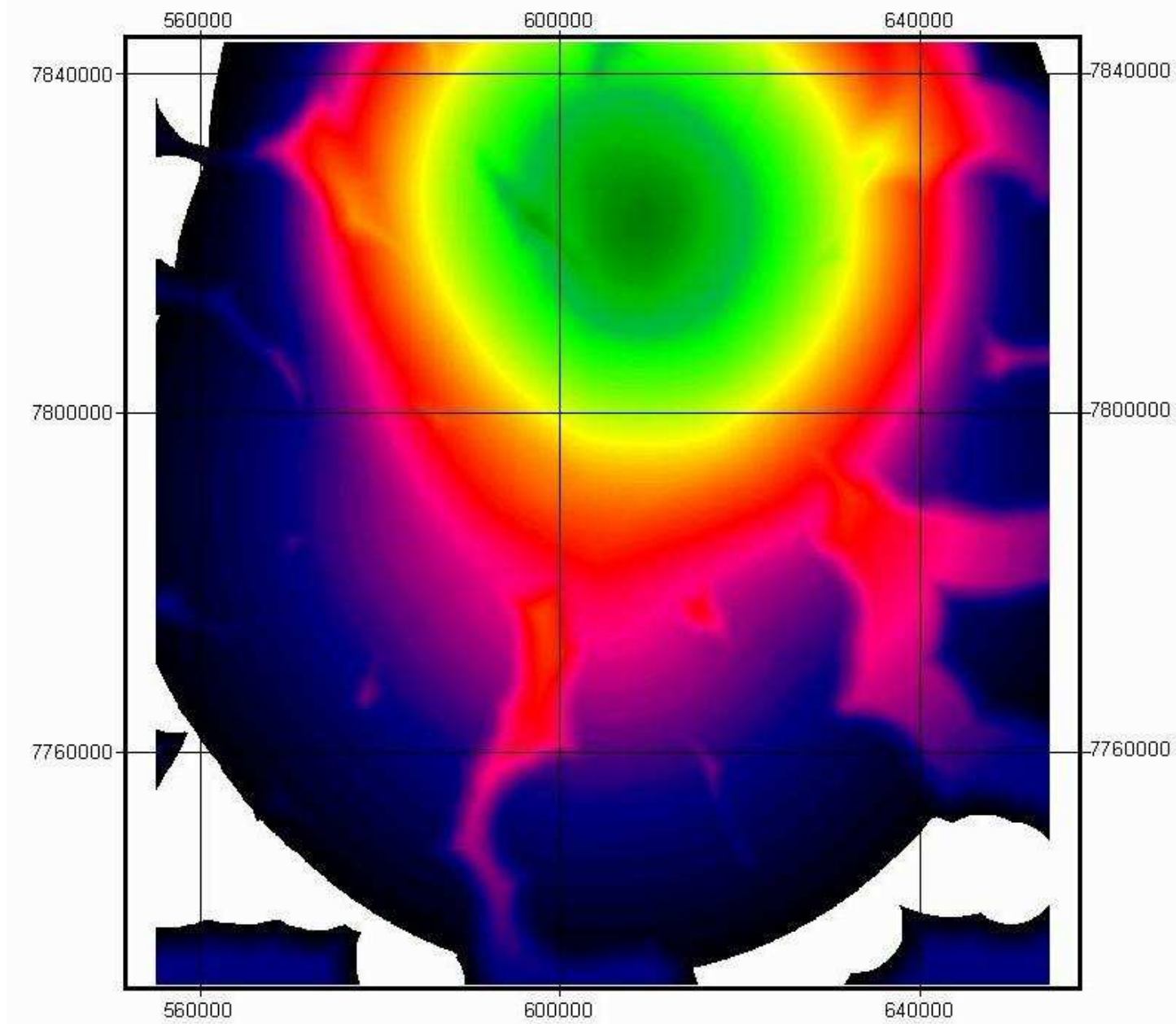
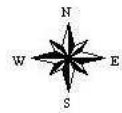
- Peso ponderado do fator F31 – 0,4286;
- Peso ponderado do fator F32 – 0,1429; e,
- Peso ponderado do fator F33 – 0,4286.

Após o cálculo destes pesos, observou-se o valor da razão de consistência (CR – consistency ratio) que foi igual a zero. Isto indica que a matriz de categorias foi gerada adequadamente, pois valores de CR inferiores a 0,10 não necessitam de reavaliação.

O procedimento de análise multicritério combinação linear ponderada (WLC) foi utilizado para o cálculo da média ponderada para cada pixel da imagem. E o resultado final é apresentado na Figura 43, imagem denominada de F3, ou seja, trata-se dos fatores operacionais agregados em uma mesma imagem.

4.2.4.7. Agregação dos fatores do 1º. nível

Os fatores do 1º. nível, juntamente com as restrições, foram agregados



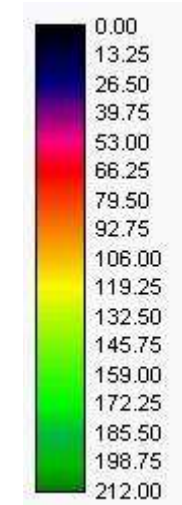
Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum Córrego Alegre
Meridiano de origem - 45o W de Greenwich

Tema:

Fator operacional

Legenda:

Adequabilidade



Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 43

através do procedimento de análise multicritério por combinação de média ponderada ordenada (OWA), considerando os respectivos pesos ponderados, ou pesos dos fatores, e os pesos ordenados. Estes últimos se relacionam com o ponto em que a análise foi realizada no espaço estratégico de decisão.

Através deste procedimento, cada fator é multiplicado pelo seu respectivo peso, eles são somados e a soma é dividida pelo número de fatores. A média ponderada é calculada para cada pixel da imagem.

Com o uso desta técnica, a posição da análise nos eixos de risco e compensação é controlada, permitindo variar o nível de risco assumido na análise e o grau em que a ponderação dos fatores influencia o mapa final de adequabilidade.

Para a agregação, procede-se anteriormente à valoração relativa entre eles com o uso do módulo Weight do programa Idrisi 32. Este módulo utiliza uma técnica de comparação de pares de fatores para desenvolver um conjunto de pesos ponderados cuja somatória é igual a um (1). Os fatores são comparados 2 a 2 em termos de sua importância relativa.

Após o cálculo dos pesos ponderados, ou pesos dos fatores, o conjunto de pesos ordenados é assumido conforme o risco e o grau de compensação em que se deseje realizar a análise multicritério.

Os fatores do 1º. nível (Fatores técnicos – F1, Fatores sócio-econômicos – F2, Fatores operacionais – F3, e Fator ambiental – F4) foram agregados após atribuição de suas importâncias relativas, e conseqüente cálculo dos pesos ponderados.

O Quadro 14 apresenta a distribuição das importâncias relativas consideradas para estes fatores, objetivando a construção do hiperanel.

Quadro 14 – Importâncias relativas entre os fatores.

Fatores	F1	F2	F3	F4
F1	1	-	-	-
F2	1/3	1	-	-
F3	3	5	1	-
F4	1/5	1/3	1/7	1

Descrição das importâncias relativas atribuídas:

- **F2 – F1: 1/3**

Considerou-se a importância relativa dos fatores sócio-econômicos como **moderadamente menos importante** que a dos fatores técnicos, por estes últimos estarem relacionados com a viabilidade técnica de construção de novas rodovias.

- **F3 – F1: 3**

Considerou-se a importância relativa dos fatores operacionais como **moderadamente mais importante** que a dos fatores técnicos, devido ao fato de que as alternativas para o hiperanel proposto neste trabalho dever-se apresentar ao entorno do município de Belo Horizonte, em planta.

- **F4 – F1: 1/5**

Considerou-se a importância relativa do fator ambiental como **fortemente menos importante** que a dos fatores técnicos, por estes últimos estarem relacionados com a viabilidade técnica de construção de novas rodovias.

- **F3 – F2: 5**

Considerou-se a importância relativa dos fatores operacionais como

fortemente mais importante que a dos fatores sócio-econômicos, devido ao fato de que as alternativas para o hiperanel proposto neste trabalho dever-se apresentar ao entorno do município de Belo Horizonte, em planta.

- **F4 – F2: 1/3**

Considerou-se a importância relativa do fator ambiental como **moderadamente menos importante** que a dos fatores sócio-econômicos, pois o primeiro trata apenas da diminuição das adequabilidades de regiões onde o tipo de cobertura vegetal –mata – é encontrado.

- **F4 – F3: 1/7**

Considerou-se a importância relativa do fator ambiental como **muito fortemente menos importante** que a dos fatores operacionais, pois o primeiro trata apenas da diminuição das adequabilidades de regiões onde o tipo de cobertura vegetal –mata – é encontrado.

O resultado do cálculo dos pesos ponderados, ou pesos dos fatores, mostra a relação entre os fatores do 1º. nível no processo de agregação dos mesmos visando à construção do hiperanel proposto neste trabalho. São eles:

- Peso ponderado do fator F1 – 0,2622;
- Peso ponderado do fator F2 – 0,1175;
- Peso ponderado do fator F3 – 0,5650; e,
- Peso ponderado do fator F4 – 0,0553.

Após o cálculo destes pesos, observou-se o valor da razão de consistência (CR – consistency ratio) que foi igual a 0,04. Isto indica que a

matriz de categorias foi gerada adequadamente, pois valores de CR inferiores a 0,10 não necessitam de reavaliação.

Primeiramente, os fatores são combinados, aplicando um peso a cada um deles – pesos ponderados ou pesos dos fatores – seguido por uma adição dos resultados.

Em seguida, um segundo conjunto de pesos – pesos ordenados – é aplicado, permitindo controlar o nível do risco assumido na análise e o grau de compensação entre os fatores.

A atitude de risco da análise e o grau de compensação entre os fatores, são medidos, respectivamente pelas variáveis Risco e Compensação dada pelas Equações 13 e 14.

Quanto menor o nível do risco assumido na análise, menor será o número de localizações adequadas encontradas para o objetivo especificado, ao final do processo de agregação entre os fatores e as restrições necessárias. E, conseqüentemente, quanto maior o nível do risco assumido na análise, maior será o número destas localizações.

No caso da compensação entre os fatores, quanto menor o seu grau, menor também será o número de localizações adequadas encontradas para um objetivo específico no cenário final de adequabilidade. E, conseqüentemente, quanto maior o seu grau, maior será o número destas localizações.

4.2.5. Cenários finais

Para a geração dos mapas finais de adequabilidade – cenários finais – as restrições booleanas foram consideradas, e as adequabilidades ao final do processo de agregação pelo procedimento OWA, modificaram-se devido à operação de multiplicação do produto destas restrições.

A partir da variação dos níveis de risco e das compensações entre os fatores do 1º. nível, alguns cenários finais foram propostos, conforme Quadro 15.

Quadro 15 – Resumo dos cenários finais propostos.

Cenários	Posição e valor dos pesos ordenados				Risco	Compensação
	1 ^a .	2 ^a .	3 ^a .	4 ^a .		
C1	0,40	0,30	0,20	0,10	0,67	0,93
C2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,50	1,00
C3	0,10	0,20	0,30	0,40	0,33	0,93
C4	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,67

Observando o espaço estratégico de decisão (Figura 18 – item 2.6.2.3., letra b) o valor 1 refere-se ao risco mínimo, e o valor zero ao risco máximo.

A Figura 44 mostra uma comparação entre os valores dos pesos ordenados assumidos nas análises OWA para geração dos cenários finais C1, C2, C3 e C4.

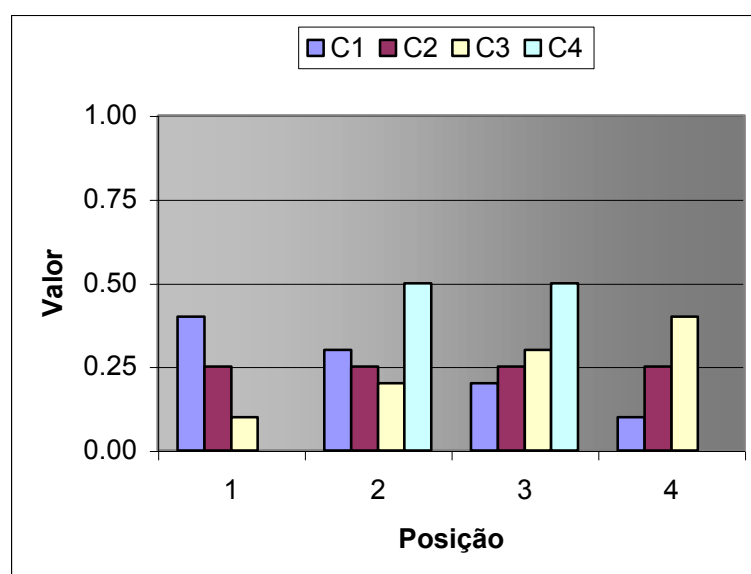


Figura 44 – Comparação entre os pesos ordenados para cenários finais C1, C2, C3 e C4.

A Figura 45 mostra o gráfico resumo das posições dos cenários finais C1, C2, C3 e C4 no espaço estratégico de decisão.

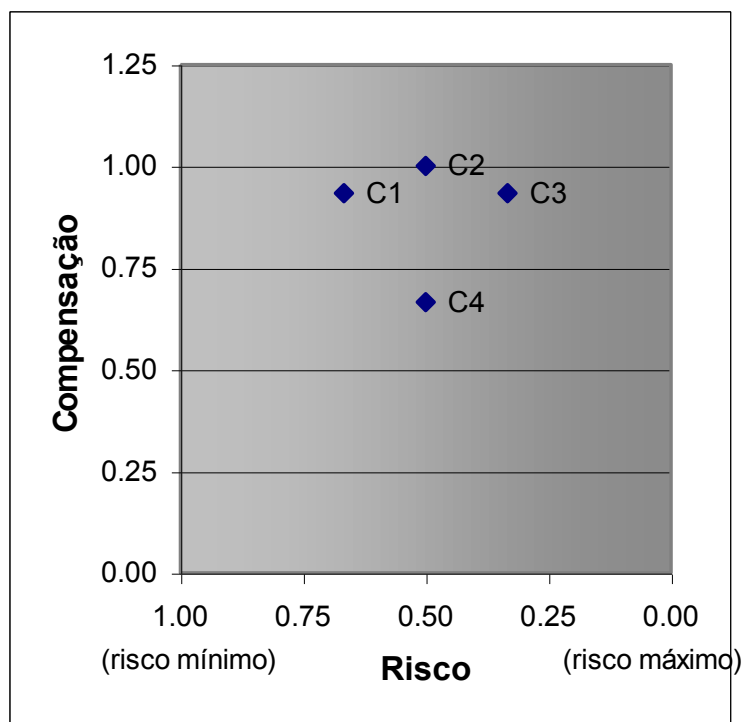
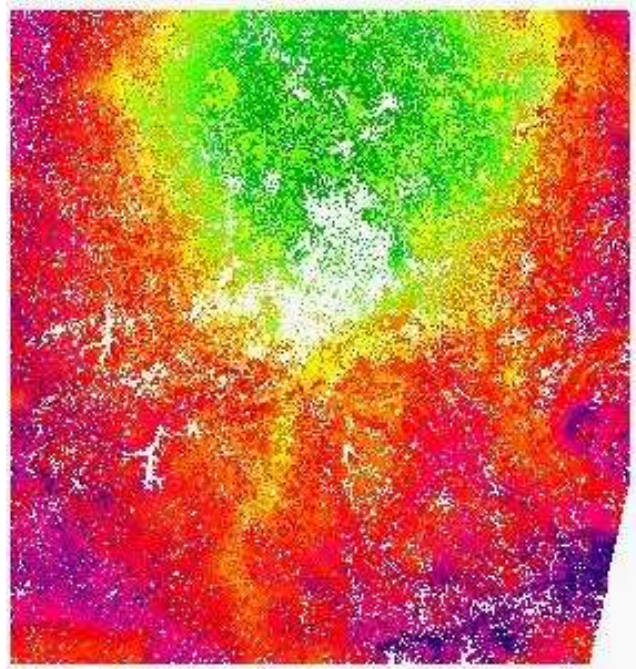
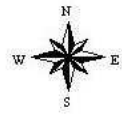


Figura 45 – Pontos de decisão para os cenários finais.

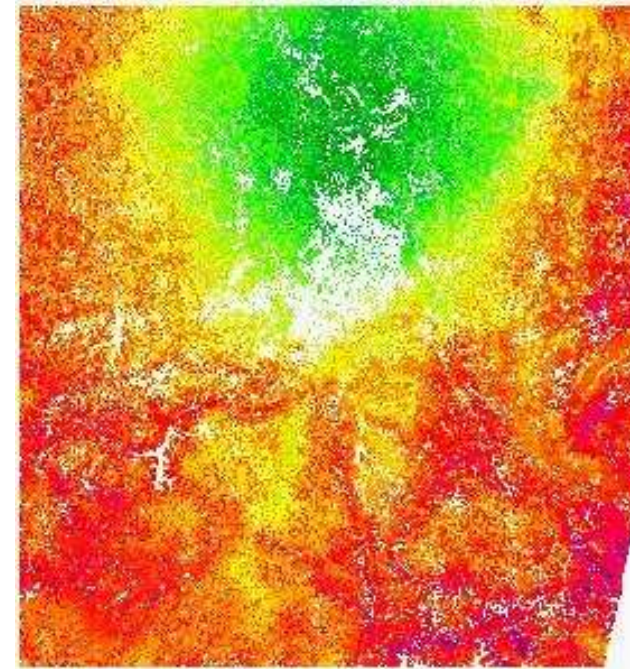
As descrições dos níveis de risco e dos graus de compensação assumidas nos cenários finais são apresentadas a seguir:

- Cenário 1 (C1) – Risco inferior ao médio, e alta compensação;
- Cenário 2 (C2) – Risco médio e compensação total;
- Cenário 3 (C3) – Risco superior ao médio, e alta compensação;
- Cenário 4 (C4) – Risco médio e compensação parcial.

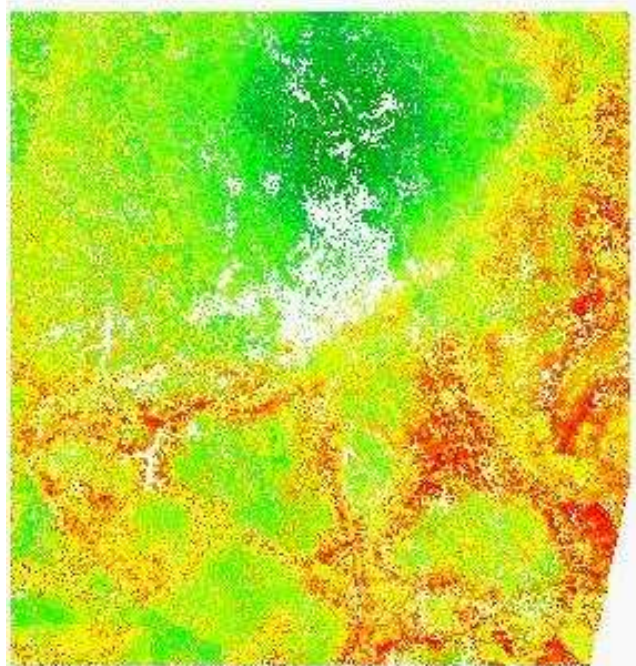
A Figura 46 mostra os quatro cenários finais resultantes das análises multicritérios OWA realizadas, para posterior proposição das alternativas do hiperanel para a RMBH.



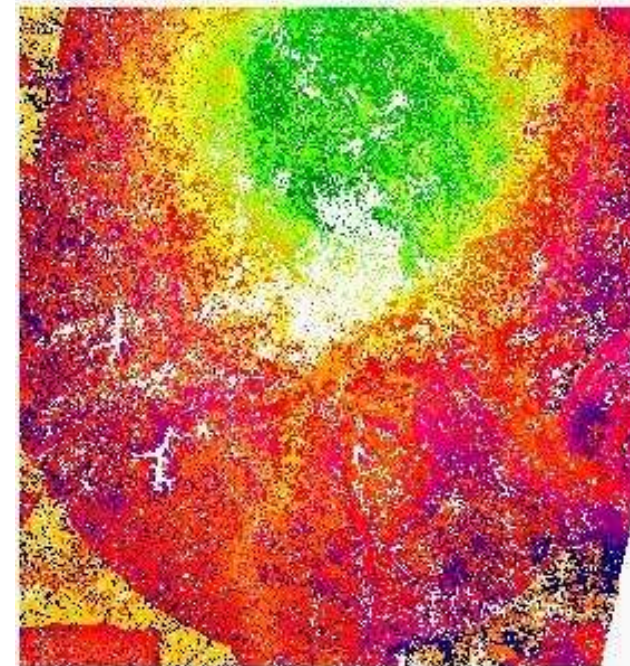
Cenário C1



Cenário C2



Cenário C3



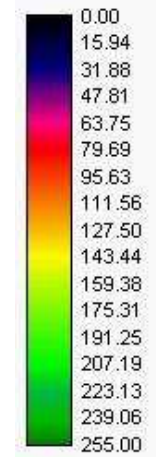
Cenário C4

Tema:

Cenários finais

Legenda:

Adequabilidade



Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

Dissertação de Mestrado:

“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

Autora: Rossana Xavier

Data: 10/02/2002

Figura 46

No processo de agregação pelo procedimento OWA, os riscos mínimo e máximo são representados pelo valor unitário (1) de peso ordenado, respectivamente, nas 1^a. e última posições do ranking.

Os cenários finais de adequabilidade contínua, gerados com estes valores, representam análises em que as atitudes de risco são: conservadora ou pessimista, no primeiro caso; e arriscada ou otimista no segundo caso.

Quanto à compensação entre os fatores, ela não ocorre em nenhum dos dois casos, uma vez que existe apenas um peso ordenado no ranking.

Ressalta-se que estas atitudes de risco não foram consideradas para a geração dos cenários finais de adequabilidade neste trabalho, por não serem compatíveis com as condições que contextualizam futuras decisões sobre as alternativas para o hiperanel rodoviário da RMBH, pois tratam de resultados cujos coeficientes de segurança poderiam ser considerados como de aversão ao risco e risco extremo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. A primeira proposta para o Hiperanel

Idealizada por CARVALHO & FANTINEL (1994) e divulgada por CARVALHO (1999), a primeira proposta para o Hiperanel de Belo Horizonte trata de um traçado passando a uma distância média da ordem de 100 km deste município, ao sul do Quadrilátero Ferrífero, e aproveitando algumas ligações já existentes, independentemente da categoria. Esta distância é justificada pela questão topográfica da região, ou seja, a proposta considera o traçado passando em áreas de declividades menos acentuadas e desviando-se de áreas íngremes, como é o caso da Serra do Curral, presente na parte centro-leste da área de estudo deste trabalho.

5.2. Alternativas de traçado para o hiperanel

As alternativas de traçado HA1, HA2, HA3 e HA4 para o Hiperanel Rodoviário da RMBH, propostas neste trabalho, foram obtidas a partir dos cenários finais C1, C2, C3 e C4, considerando as melhores localizações, ou

seja, as áreas com valores maiores de adequabilidades, e respeitando as áreas não adequadas, cuja adequabilidade é nula e se referem às restrições consideradas nas análises multicritérios realizadas – áreas de núcleos urbanos, do Aeroporto de Confins, e áreas de lagoas e represas (Figura 47).

Estas alternativas possuem seus traçados passando pelo Aeroporto de Confins, com o objetivo de estimular o trânsito de veículos até o mesmo, cortando os principais rios presentes na área de estudo – Rio Paraopeba e Rio das Velhas –, e interceptando, em nível diferenciado, as principais rodovias que servem à Região Metropolitana de Belo Horizonte – BR-040, BR-262 e BR-381 – sem promover tráfego adicional a elas. Estas alternativas de traçado para o hiperanel possuem alguns trechos em comum, conforme Figura 48.

Ressalta-se que a máxima distância, foi de aproximadamente, 55 km para a proposta de traçado nº. 3 (HA3), a qual se refere ao cenário final C3 (maior atitude de risco entre os demais cenários e, conseqüentemente, mais localizações adequadas).

5.2.1. Descrição das alternativas

a. Hiperanel 1 – HA1

A alternativa de traçado nº. 1 (HA1) apresenta um comprimento de aproximadamente 572 km de extensão em torno do município de Belo Horizonte e possui distância máxima em relação a este município da ordem de 36 km.

Começando pelo Aeroporto de Confins e seguindo o sentido horário, esta alternativa continua, passando pelas proximidades das sedes dos municípios: Vespasiano, Sabará, Nova Lima, Mário Campos, Brumadinho, Ribeirão das Neves, Pedro Leopoldo, retornando ao aeroporto.

Este traçado aproveita algumas ligações existentes, como mostra a Figura 49. Independentemente da classe de rodovia do hiperanel HA1, o

trecho da rodovia MG-437 pertencente a ele de 45,72 km, deverá ser pavimentado. Para a implantação desta alternativa de traçado, será necessária a construção de 341,51 km de novos trechos de rodovias.

b. Hiperanel 2 – HA2

A alternativa de traçado n.º. 2 (HA2) apresenta um comprimento de aproximadamente 642 km de extensão em torno do município de Belo Horizonte e possui distância máxima em relação a este município da ordem de 42 km.

Começando pelo Aeroporto de Confins e seguindo o sentido horário, esta alternativa continua, passando pelas proximidades das sedes dos municípios: Vespasiano, Caeté, Rio Acima, Brumadinho, Mário Campos, Esmeraldas, Pedro Leopoldo, retornando ao aeroporto.

Este traçado aproveita algumas ligações existentes, como mostra a Figura 50. Independentemente da classe de rodovia do hiperanel HA2, um pequeno trecho de rodovia não pavimentada de 1,74 km, ligando a rodovia MG-435 a ele deverá ser pavimentado. Para implantação desta alternativa de traçado, será necessária a construção de 409,55 km de novos trechos de rodovias.

c. Hiperanel 3 – HA3

A alternativa de traçado n.º. 3 (HA3) apresenta um comprimento de aproximadamente 840 km de extensão em torno do município de Belo Horizonte e possui distância máxima em relação a este município da ordem de 57 km.

Começando pelo Aeroporto de Confins e seguindo o sentido horário, esta alternativa continua, passando pelas proximidades das sedes dos

municípios: Caeté, Rio Acima, Rio Manso, Florestal, Matozinhos e Pedro Leopoldo, retornando ao aeroporto.

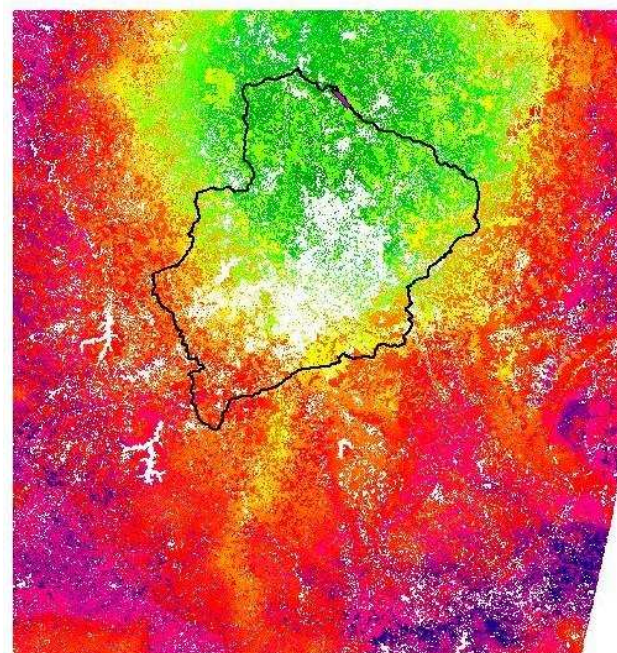
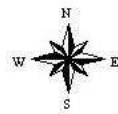
Este traçado aproveita algumas ligações existentes, como mostra a Figura 51. Independentemente da classe de rodovia do hiperanel HA3, um pequeno trecho de rodovia não pavimentada de 1,74 km, ligando a rodovia MG-435 a ele deverá ser pavimentado, assim como os trechos das rodovias MG-030 (35,04 km) e MG-040 (30,18 km), pertencentes a ele. Para a implantação desta alternativa de traçado, será necessária a construção de 640,79 km de novos trechos de rodovias.

d. Hiperanel 4 – HA4

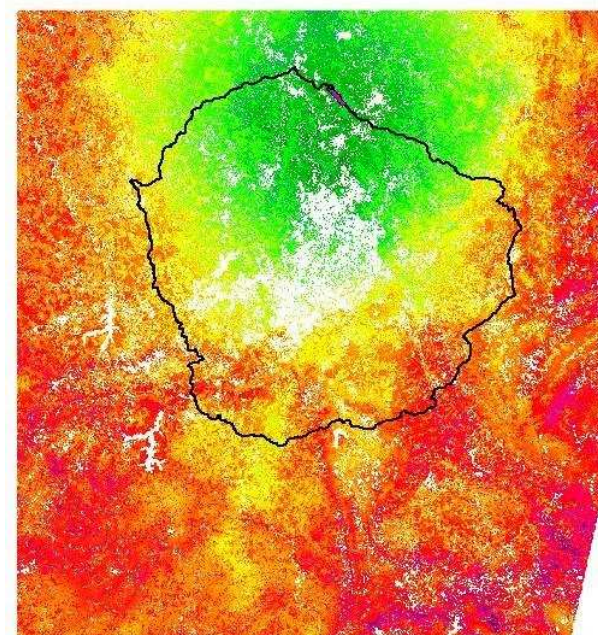
A alternativa de traçado n.º. 4 (HA4) apresenta um comprimento de aproximadamente 588 km de extensão em torno do município de Belo Horizonte e possui distância máxima em relação a este município da ordem de 39 km.

Começando pelo Aeroporto de Confins e seguindo o sentido horário, esta alternativa continua, passando pelas proximidades das sedes dos municípios: Vespasiano, Brumadinho, Mário Campos e Pedro Leopoldo, retornando ao aeroporto.

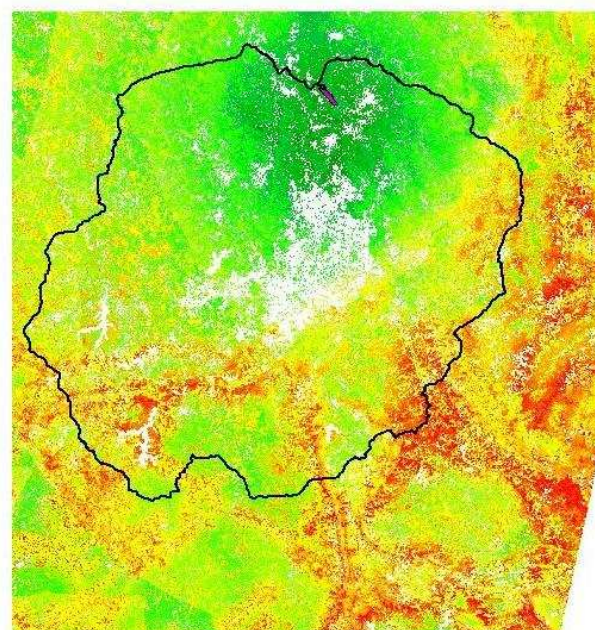
Este traçado aproveita algumas ligações existentes, como mostra a Figura 52, e não apresenta trechos de rodovias não pavimentadas. Para a implantação desta alternativa de traçado, será necessária a construção de 452,69 km de novos trechos de rodovias.



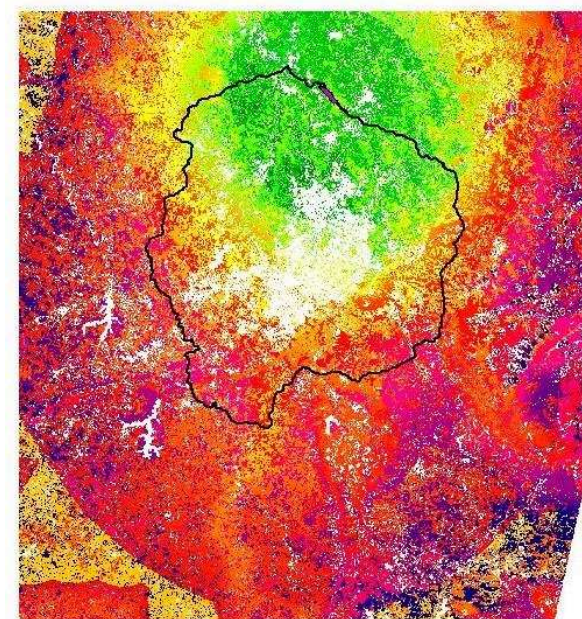
Alternativa HA1 – Cenário C1



Alternativa HA2 – Cenário C2





Alternativa HA3 – Cenário C3



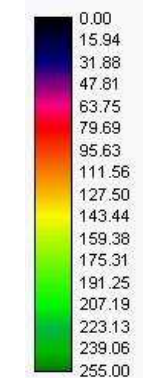
Alternativa HA4 – Cenário C4

Tema:
Alternativas de traçado nos
respectivos cenários finais

Legenda:

-  Aeroporto de Confins
-  Alternativas de traçado
HA1, HA2, Ha3 e HA4

Adequabilidade



Universidade Federal de Viçosa

Departamento de Engenharia
Civil

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil

Laboratório de Pesquisa da Pós-
graduação – LabSigeo

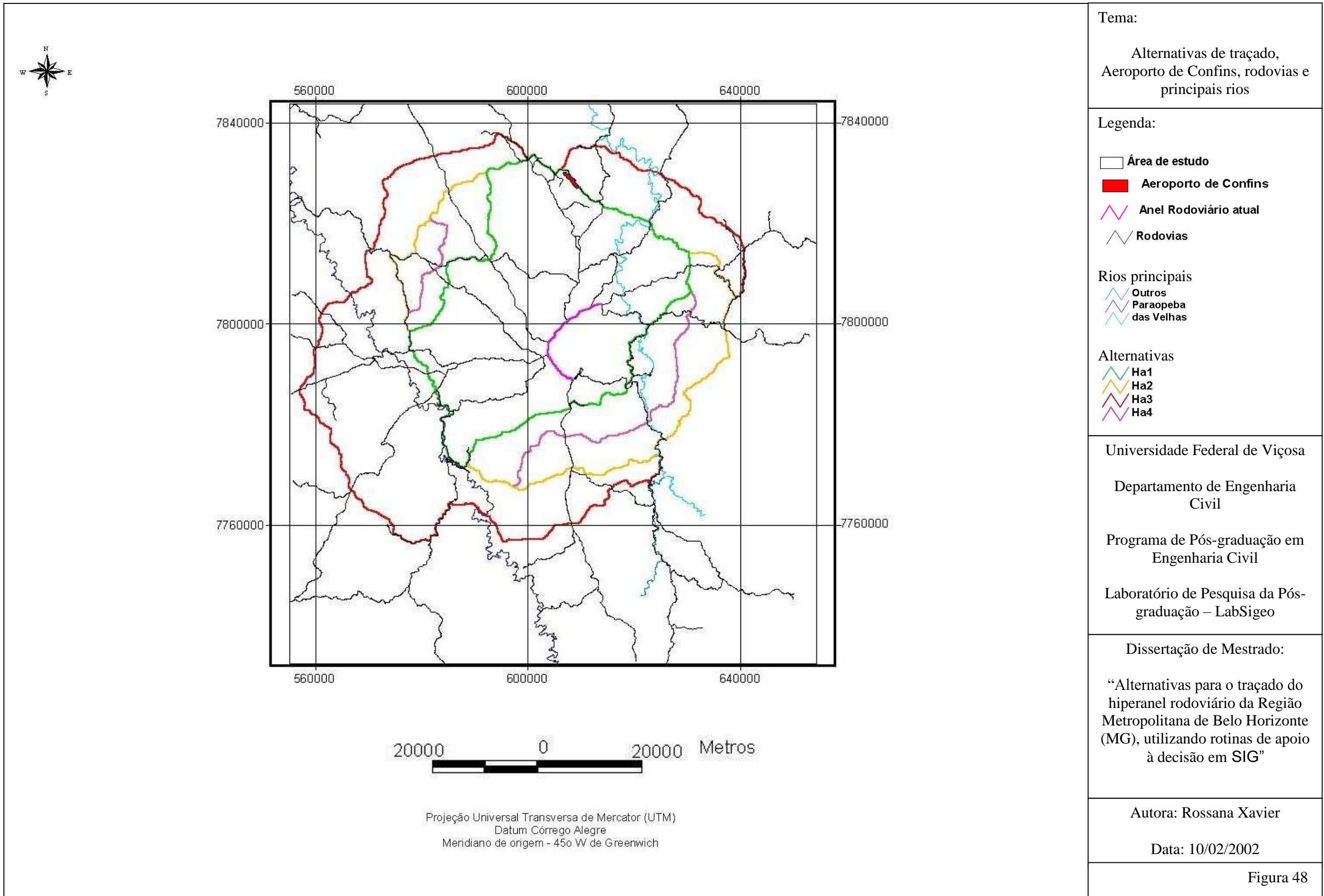
Dissertação de Mestrado:

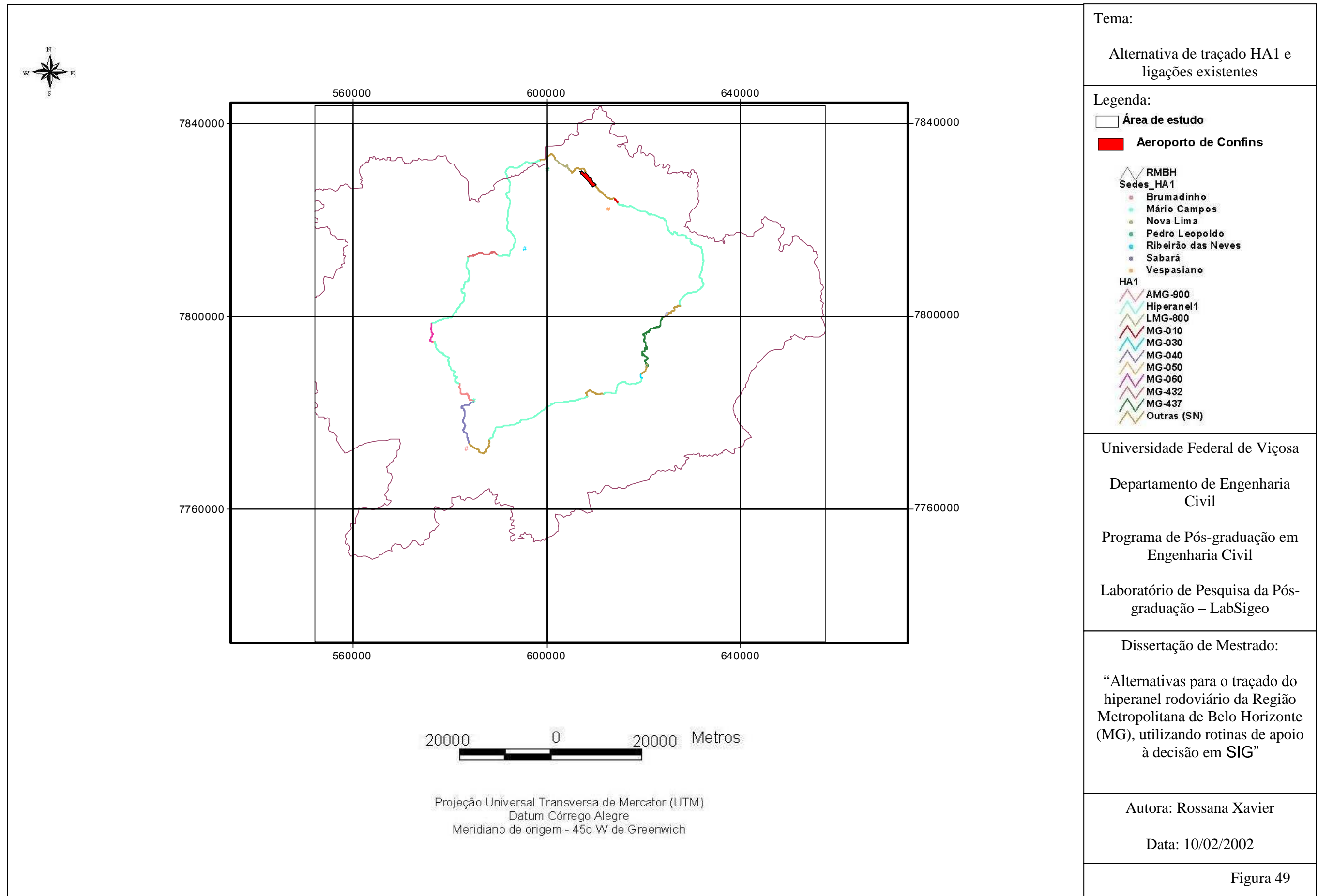
“Alternativas para o traçado do
hiperanel rodoviário da Região
Metropolitana de Belo Horizonte
(MG), utilizando rotinas de apoio
à decisão em SIG”

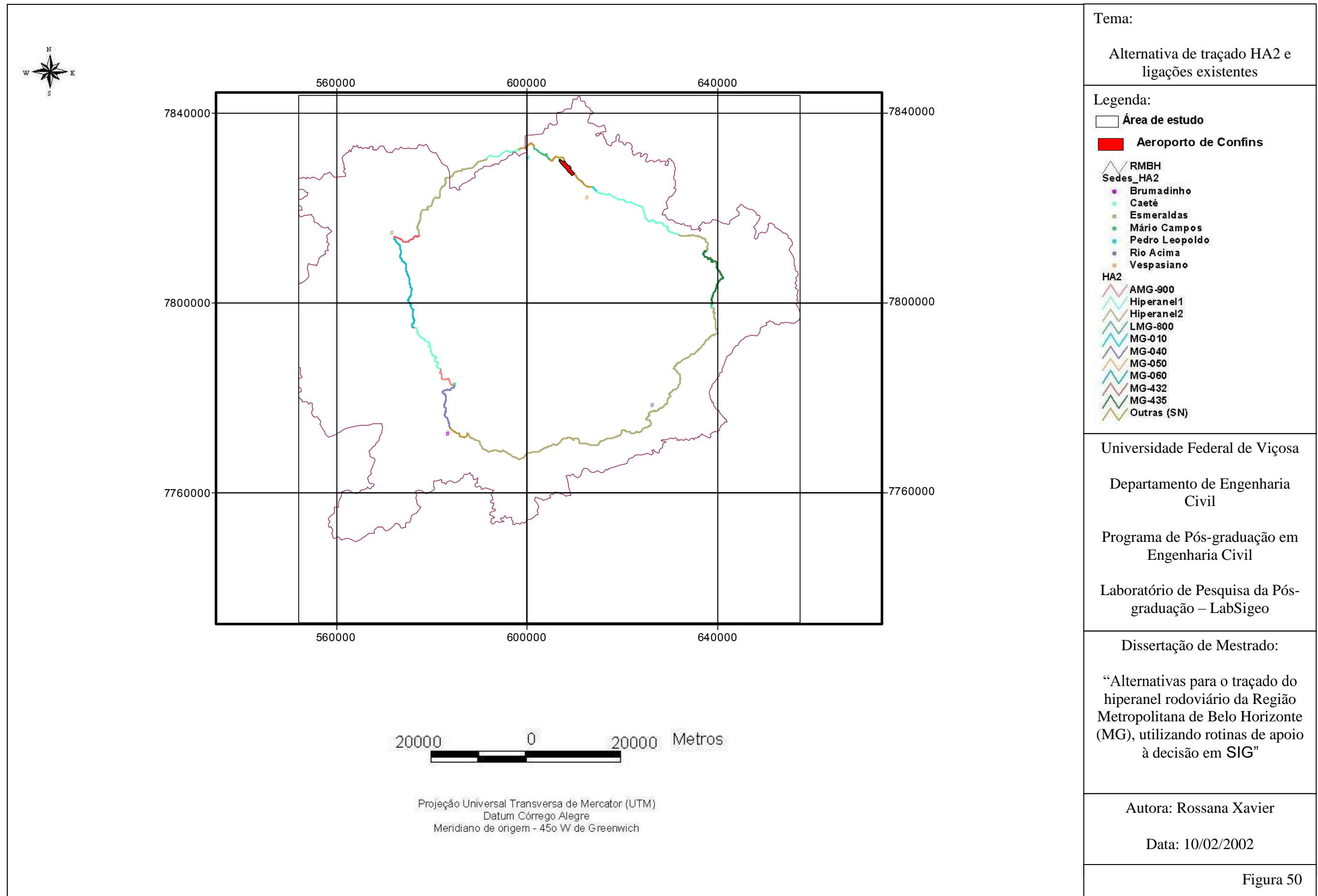
Autora: Rossana Xavier

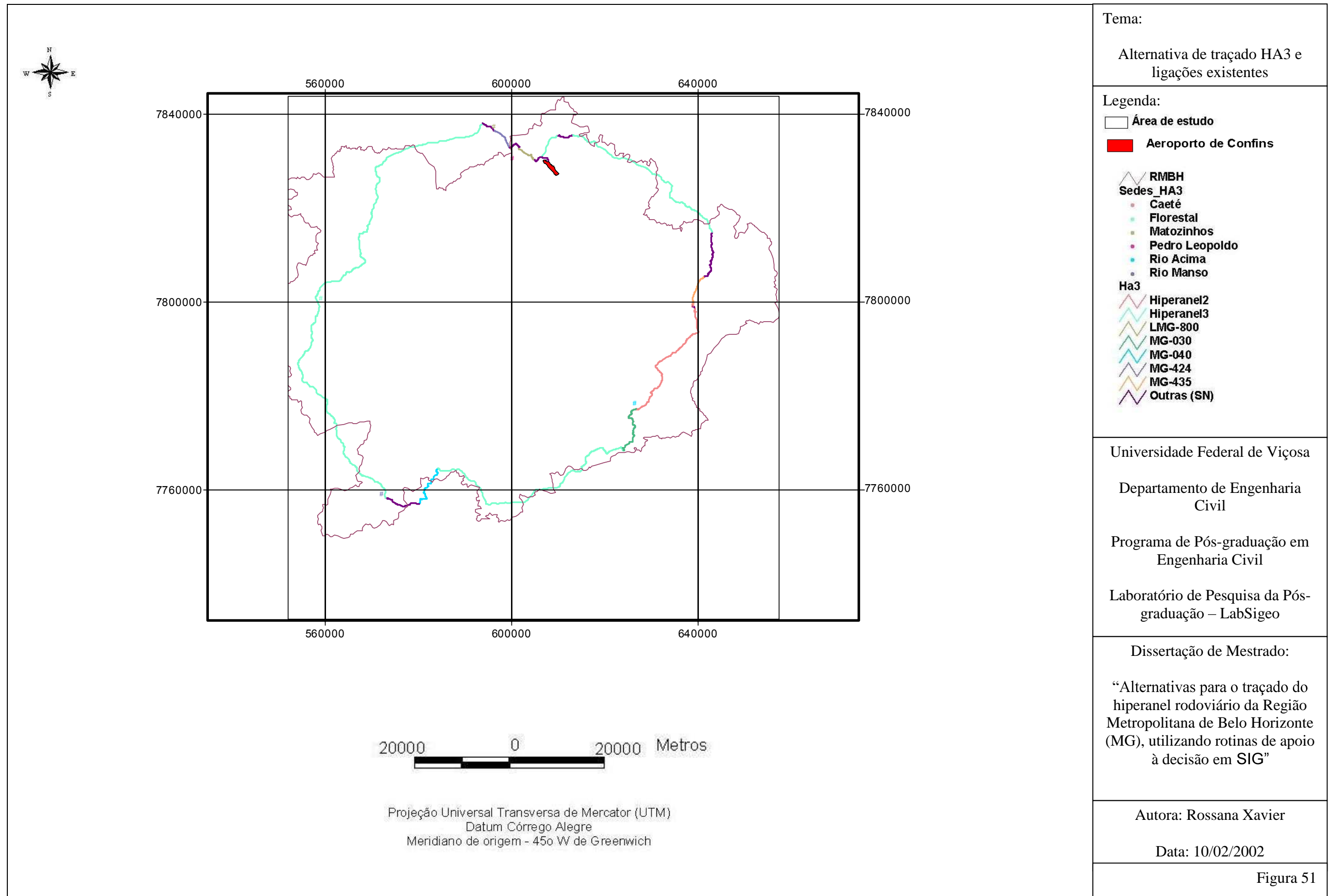
Data: 10/02/2002

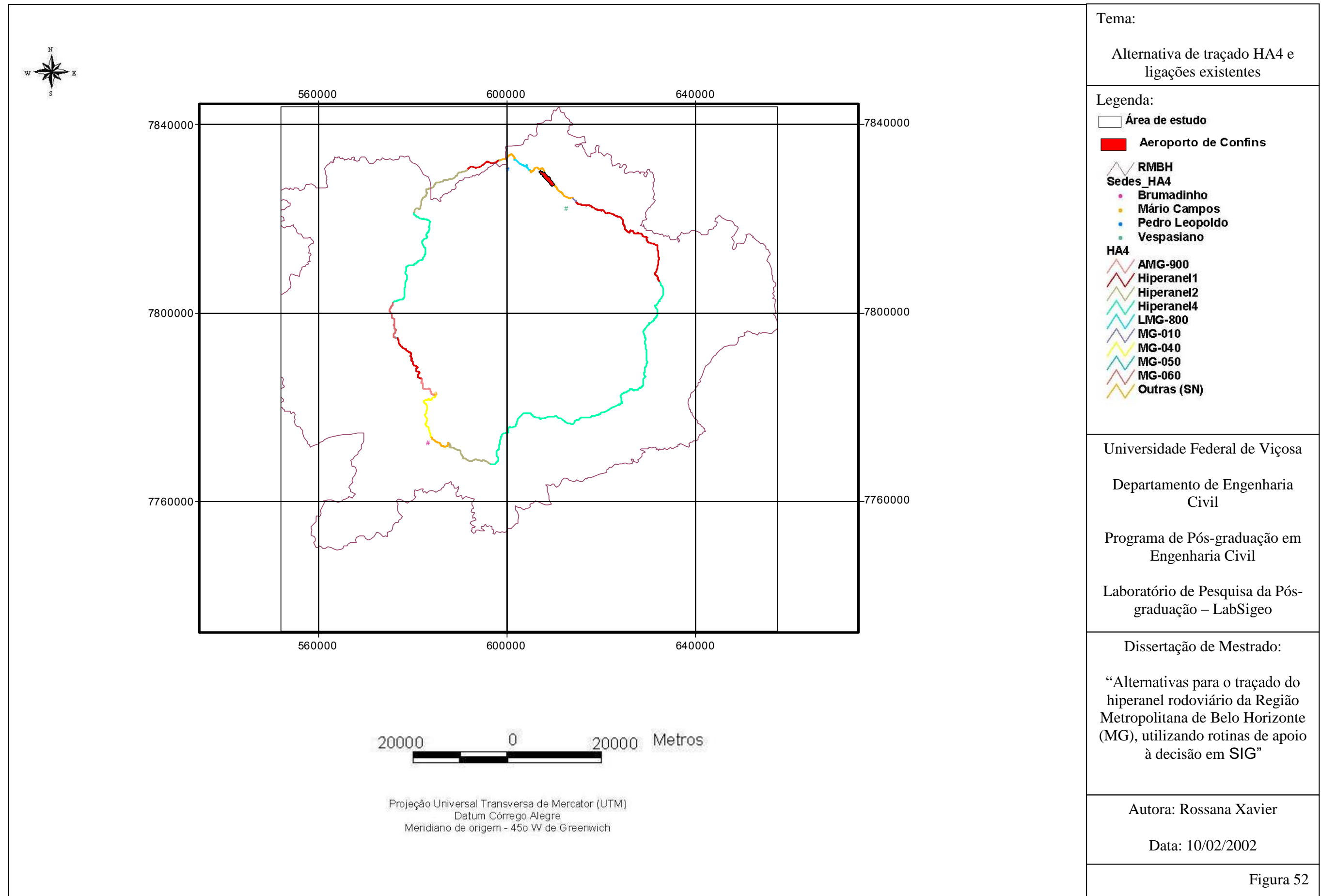
Figura 47











5.3. Comparação entre as alternativas

Observando o Quadro 15 e a Figura 45 do item 4.2.5, verifica-se que a distribuição, a posição e os valores dos pesos ordenados condicionaram os níveis dos riscos assumidos nas análises multicritérios realizadas, e influenciaram os graus de compensação entre os fatores.

Assim, a alternativa HA1, obtida do cenário final C1, cujo nível de risco assumido na análise foi inferior ao médio e alto grau de compensação entre os fatores, apresentou-se com a menor extensão, pois as localizações mais adequadas se restringiram dentro do cenário de adequabilidade contínua. O custo de construção de novos trechos de rodovias será o menor entre as quatro opções, no caso de implantação desta alternativa.

Por outro lado, o custo de pavimentação dos 45,72 km de estradas não pavimentadas será um dos maiores entre as opções, além do fato de que esta alternativa de traçado para o hiperanel da RMBH, situando-se próxima ao município de Belo Horizonte (distância máxima da ordem de 36 km), poderá rapidamente encontrar-se saturada para a sua capacidade operacional.

No caso da alternativa HA2, obtida do cenário final C2, cujo nível de risco assumido na análise foi médio e compensação total entre os fatores, apresentou-se com extensão superior a da alternativa HA1, pois as localizações mais adequadas aumentaram, com o aumento do grau de compensação e do nível de risco assumidos para a geração do cenário de adequabilidade contínua. O custo de construção de novos trechos de rodovias será um pouco mais elevado que para a primeira opção, no caso de implantação desta alternativa.

Mas, por outro lado, o custo de pavimentação será o menor entre as quatro opções, pois o trecho não pavimentado pertencente a este traçado é de apenas 1,74 km; e a alternativa HA2, possuindo traçado mais afastado do

município de Belo Horizonte (distância máxima da ordem de 42km), poderá suportar sua capacidade operacional por maior período de tempo.

No caso da alternativa HA3, obtida do cenário final C3, cujo nível de risco assumido na análise foi superior ao médio e alta compensação entre os fatores, apresentou-se com extensão superior a da alternativa HA2, pois foram encontradas mais localizações adequadas com o aumento do grau de compensação e do nível de risco assumidos para a geração do cenário de adequabilidade contínua. O custo de construção de novos trechos de rodovias será o maior entre as opções, assim como o custo de pavimentação dos 66,96 km de estradas não pavimentadas será o maior entre as quatro alternativas.

Mas, por outro lado, situando-se mais afastada do município de Belo Horizonte (distância máxima da ordem de 55km), esta alternativa de traçado para o hiperanel da RMBH poderá suportar sua capacidade operacional por maior período de tempo.

E finalmente, para a alternativa HA4, obtida do cenário final C4, cujo nível de risco assumido na análise foi médio, igual ao risco assumido para a obtenção da alternativa HA2, mas com compensação parcial entre os fatores. Ela apresentou-se com extensão inferior a da alternativa HA2, pois as localizações mais adequadas diminuíram devido à redução do grau de compensação entre os fatores. Comparando as alternativas de traçados HA1 e HA4, esta última apresentou-se com extensão superior à primeira, devido ao risco assumido na análise multicritério ter sido maior, apesar da compensação ter sido menor. O custo de construção de novos trechos de rodovias será menor que para a primeira opção, e maior que para a segunda opção de traçado. Mas não será necessária a pavimentação de trechos desprovidos de pavimento, o que poderá diminuir o custo final.

Esta alternativa de traçado para o hiperanel da RMBH, situando-se também menos afastada do município de Belo Horizonte (distância máxima da

ordem de 39km), poderá rapidamente encontrar-se saturada para a sua capacidade operacional.

O Quadro 16 apresenta um resumo das características das quatro alternativas de traçado propostas neste trabalho para o hiperanel da RMBH.

Quadro 16 – Resumo das características das alternativas de traçado para o hiperanel da RMBH.

Alternativas de traçado	HA1	HA2	HA3	HA4
Características				
Extensão total (km)	572	642	840	588
Distância máxima da sede do município de BH (km)	36	42	55	39
Trechos a serem pavimentados (km)	45,72	1,74	66,96	–
Novos trechos a serem construídos (km)	341,51	409,55	640,79	452,69
Superação da capacidade operacional	rápida	média	lenta	rápida

O Quadro 17 apresenta um resumo dos custos quando da implantação destas alternativas, sendo que estes custos foram considerados de forma qualitativa e em termos comparativos entre as alternativas.

Com relação aos custos de construção de estruturas de drenagem e obras de arte, como pontes para transposição dos principais rios presentes na área de estudo, e bueiros e viadutos para transposição de talvegues, eles dependerão, respectivamente, da largura do rio e da forma do relevo nos pontos de transposição.

E os custos referentes à construção de obras de drenagem, como sarjetas, valetas e tubulações, que acompanham a pista de rolamento, estarão diretamente relacionados às extensões dos novos trechos a serem construídos para cada alternativa de traçado

Quadro 17 – Resumo dos custos, quando da implantação das alternativas de traçado propostas para o hiperanel da RMBH.

Alternativas de traçado	HA1	HA2	HA3	HA4
Custos				
Pavimentação (qualitativo e em termos comparativos entre as alternativas)	alto	baixo	mais alto	–
Construção de novos trechos (qualitativo e em termos comparativos entre as alternativas)	baixo	médio	alto	baixo-médio
Obras de arte (pontes) para transposição dos rios principais	depende da largura do rio	depende da largura do rio	depende da largura do rio	depende da largura do rio
Obras de arte (bueiros, viadutos) para transposição de talwegues	depende relevo	depende relevo	depende relevo	depende relevo
Obras de drenagem (sarjetas, valetas, tubulações) que acompanham a pista de rolamento	baixo	médio	alto	baixo-médio

5.4. Faixa de domínio

Segundo CARVALHO et al. (1993), a faixa de domínio é uma faixa de terra que abrange áreas adjacentes, além da faixa de ocupação da rodovia, destinada ao alargamento da mesma. Sua largura é fixada de acordo com a

classe da rodovia (Quadro 4 – item 2.1.9.3.), podendo variar de 30 a 80 metros.

Considerando os trechos de rodovias para as alternativas de traçado do hiperanel da RMBH como sendo pertencentes à classe I do referido Quadro 4, seja em pista dupla ou em pista simples, a largura da faixa de domínio depende também do tipo de região atravessada por eles – plana, ondulada ou montanhosa. Para a classe I, são especificados os valores, conforme DNER (1999):

- Região plana – largura da faixa de domínio = 60 metros;
- Região ondulada – largura da faixa de domínio = 70 metros; e,
- Região montanhosa – largura da faixa de domínio = 80 metros.

Logo, estes valores foram utilizados para a consideração das áreas destinadas às faixas de domínio para as respectivas alternativas HA1, HA2, HA3 e HA4, de acordo com o tipo de região atravessada por elas, ou seja, quando em regiões de inclinações do terreno pequenas, como na parte noroeste da área de estudo, adotou-se o valor de 60 metros; em regiões com inclinações do terreno medianas, como em algumas áreas na parte sudoeste, adotou-se o valor de 70 metros; e nas regiões montanhosas, localizadas na parte sudeste da área de estudo, o valor de 80 metros foi adotado. Sendo que, para a alternativa de traçado HA3, de maior extensão, adotou-se o valor de 80 metros para a faixa de domínio na parte centro-oeste, devido às elevadas inclinações do terreno nesta região.

6. RESUMO E CONCLUSÕES

Buscou-se, com este trabalho, propor algumas alternativas de traçado para o hiperanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), utilizando rotinas de apoio à decisão em ambiente de Sistema de Informação Geográfica.

As proposições apresentadas resultaram do processo de aplicação da regra de decisão envolvendo critérios múltiplos, denominado de Análise Multicritério, o qual faz uso de algumas funções do conjunto fuzzy para padronização dos critérios em escala contínua de adequabilidade, e de técnicas de agregação dos mesmos, como a Combinação Linear Ponderada (Weighted Linear Combination – WLC) e a Média Ponderada Ordenada (Ordinate Weighted Average – OWA).

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- i. A metodologia de auxílio à decisão, juntamente com a ferramenta computacional – Sistema de Informação Geográfica, mostrou-se muito interessante e adequada para tratamento e análise de dados geográficos, possibilitando a seleção e ordenação dos critérios envolvidos e conduzindo a resultados coerentes e satisfatórios, que poderão orientar futuras tomadas de decisão sobre os espaços disponíveis, auxiliando no

planejamento e ocupação do solo, e favorecendo o desenvolvimento regional.

- ii. Ressalta-se que quanto maior a disponibilidade dos conjuntos de dados, maior e melhor são as interpretações realizadas e conseqüentes tomadas de decisão. Neste sentido, a inexistência ou a não disponibilidade das informações prejudica e até mesmo inviabiliza a realização de um trabalho que depende das mesmas. No caso de Sistema de Informação Geográfica e Análise Multicritério, isto pode acontecer, uma vez que o dado é o elemento fundamental.
- iii. A inexistência de mapeamento geotécnico e a inexistência de outros mapeamentos em escalas superiores a 1:250.000, de toda a área de estudo, prejudicou o desenvolvimento do trabalho no que se refere às realidades encontradas em cada região mapeada, mas evidencia a necessidade de geração destas informações, o que não foi objeto de estudo do mesmo.
- iv. Quanto ao mapeamento dos usos e ocupações do solo, lamenta-se a não disponibilização do mapa existente, em escala 1:100.000 para todo o Estado de Minas Gerais, o qual foi solicitado junto ao Instituto Estadual de Florestas – IEF.
- v. O resultado das análises efetuadas constituirá subsídio importante à tomada de decisão sobre a melhor alternativa de traçado para o hiperanel rodoviário da RMBH, possibilitando uma escolha futura mais racional dos pontos de vista técnico, econômico, social e parcialmente ambiental, uma vez que não se considerou nas análises uma restrição ambiental referente às regiões de preservação existentes na área de estudo, por não ter sido possível verificar as suas localizações através da imagem orbital.

- vi. A escolha da melhor alternativa dentre as quatro opções propostas neste trabalho, depende de informações adicionais que complementam os resultados obtidos.
- vii. As análises espaciais mostram-se dinâmicas, pois na medida em que outras informações forem geradas ou adquiridas, poderão ser incorporadas ao processo de auxílio à decisão em ambiente SIG, aprimorando os resultados obtidos.
- viii. Faz-se necessário, também, a formação de uma equipe multidisciplinar, para tratamento das informações pelos diversos especialistas, que serão combinadas para gerar informações novas. Porém, eles devem ter conhecimento da metodologia e da ferramenta computacional utilizadas.

7. RECOMENDAÇÕES

A metodologia de auxílio à decisão, juntamente com a ferramenta computacional – Sistema de Informação Geográfica, mostrou-se muito interessante e adequada para tratamento e análise de dados geográficos, possibilitando a seleção e ordenação dos critérios envolvidos e conduzindo a resultados coerentes e satisfatórios que poderão orientar futuras tomadas de decisão sobre os espaços disponíveis, auxiliando no planejamento e ocupação do solo, e favorecendo o desenvolvimento regional.

Porém, algumas recomendações são sintetizadas a seguir visando orientar e otimizar as atualizações das futuras análises multicritérios para aprimoramento dos resultados obtidos, e conseqüente escolha da melhor alternativa para o traçado do hiperanel rodoviário da Região Metropolitana de Belo Horizonte. São elas:

- i. Utilizar as classificações pedológicas para estimar as características geotécnicas dos diversos tipos de solos.
- ii. Com o uso do mapa hidrográfico, delimitar as regiões geográficas de acordo com a densidade de drenagem presente nas mesmas, com o

objetivo de estimar o custo de construção de obras de arte, como bueiros e viadutos, para transposição de talwegues, quando da implantação de uma das quatro alternativas de traçado propostas.

- iii. A partir da obtenção de mapeamentos em escalas superiores às que foram utilizadas ou obtenção de outros mapeamentos que não foram empregados nas análises realizadas, gerar novos cenários para definição das possíveis alternativas de traçado, e conseqüente definição da melhor dentre as opções encontradas.
- iv. Aprimorar o mapa de uso e ocupação do solo para a área de estudo através de imagem orbital com resolução superior a 30 metros, visitas às regiões dessa área, ou ainda, conseguir o mapeamento existente, em escala 1:100.000, junto ao Instituto Estadual de Florestas – IEF que foi negado a esse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA – AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Site oficial. Disponível em <www.ana.gov.br>. 2001.
- AVILA, A.V. **O Método dos Conjuntos Nebulosos no Processo de Decisão – Aplicação à Avaliação de Propostas de Projetos**. Rio de Janeiro, RJ: PUC-RJ, 1982. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Industrial – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1982.
- AZEVEDO, M.A.A. **Contribuição ao Estudo Geotécnico de Solos de Viçosa-MG**. Viçosa, MG. UFV: 1999. 129p. il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- BURROUGH, P.A. & McDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press Inc. New York, USA. 2000.
- CALIJURI, M.L.; MEIRA, A.D.; LORENTZ, L.F. **Módulo 1 – Fundamentos de SIG**. Apostila. Programa de Capacitação Técnica. 1999.
- CALIJURI, M.L.; MEIRA, A.D.; LORENTZ, L.F.; BHERING, E.M. **Análises Espaciais com Sistemas de Informações Geográficas**. Apostila. 2000a.
- CALIJURI, M.L.; MEIRA, A.D.; LORENTZ, L.F.; BHERING, E.M. **Sensoriamento Remoto**. Apostila. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. 2000b.
- CARVALHO, C.A.B.; LOSS, Z.J.; LIMA, D.C.; SOUZA, A.C.V. **Estradas – Projeto (Introdução, Concordância Horizontal, Superelevação e Superlargura)**. Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. Publicação n.º. 336. 1993. 64p.

- CARVALHO, E.T. **Geologia Urbana para Todos: Uma Visão de Belo Horizonte**. Belo Horizonte, MG. 1999. 176p.
- CARVALHO, E.T. & FANTINEL, L.M. **Unidade de Proposição no. 18 (UP18)**. In: SILVA, A. B.; CARVALHO, E. T.; FANTINEL, L. M.; ROMANO, A. W. ; VIANA, C.S. Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no município de Belo Horizonte, MG. (Relatório Final, inédito). PBH/FUNDEP/UFMG - IGC. Belo Horizonte, 1994.
- CETEC – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Projeto: **Estudos Integrados de Recursos Naturais da Bacia do Alto São Francisco e Parte Central da Área Mineira da SUDENE**. Belo Horizonte (MG), 1984.
- CREA/MG – CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E AGRONOMIA DE MINAS GERAIS. Site oficial. Disponível em <www.crea-mg.com.br>. 2002.
- DER/MG – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Site oficial. Disponível em <www.der.mg.gov.br>. 2002.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Rio de Janeiro. 1999. 195p. (IPR. Publ.,706).
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Histórico do Rodoviarismo**. Site oficial. Disponível em <www.dner.gov.br>. 2002a.
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Condições de rodovias**. Site oficial. Disponível em <www.dner.gov.br>.2002b.
- EASTMAN, J.R. **Guide to GIS and Image Processing**. Volume 2. IDRISI 32. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University. U.S.A. 1999.
- FATORGIS – INFORMAÇÕES E EVENTOS GEOTECNOLÓGICOS. Site oficial. Disponível em <www.fatorgis.com.br>. 2000.
- GALVES, M.L. & HACHICH, W. **Análise de Decisões em Geotecnia Ambiental: Exemplo de Aplicação à Escolha do Traçado de Rodovias**. Revista Solos e Rochas, São Paulo, 23, (2): 93-111. Agosto, 2000.

- GEIPOT – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Site oficial. Disponível em <www.transportes.gov.br>. 2000.
- GEOMINAS – PROGRAMA GEOMINAS. Site oficial. Disponível em <www.geominas.mg.gov.br>. 2000.
- HENTRICH, H. **La Moderna Construcción de Carreteras**. Editorial Labor, S.A. Barcelona, Madrid, Buenos Aires. 1934.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Site oficial. Disponível em <www.ibge.gov.br>. 2001
- LILLESAND, T. M. et. al. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons. 1994. 750p.
- LIMA, D.C.; BUENO, B.S; FONTES, M.P.F. **Utilização de Levantamentos de Solos em Geotecnia**. Viçosa, MG. SBCS/UFV/DPS. 1996. 18p.
- LIMA, D.C.; RÖHM, S.A.; BUENO, B.S. **Tópicos em Estradas**. Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. Publicação n°. 205. 1985. 126p.
- LIMA, M.M.P.P. **Auxílio Multicritério à Decisão na Avaliação Econômica, Social e Ambiental da RJ-165, Paraty-Cunha**. Rio de Janeiro, RJ: PUC-RJ, 1991. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Industrial – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1991.
- MAIA, R.M. **Lógica Fuzzy**. Disponível em <www.wac.com.br/rodrigo/Fuzzy.html >. 2001.
- MARQUES, E.A.G. **Notas de Aula Referente à Disciplina CIV 631 – Geologia de Engenharia**. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2000.
- MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 1997. 380p.
- MELO, A.L.O. **Avaliação e Seleção de Áreas para Implantação de Aterro Sanitário Utilizando Lógica Fuzzy e Análise Multi-critério: Uma Proposta Metodológica. Aplicação ao Município de Cachoeiro de Itapemerim – ES**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 186p. il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995. 231p.

- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**, Ed. Edgard Blucher Ltda, 1992. 307 p.
- PARSONS, A.W. **The Rapid Measurement of the Moisture Condition of Earthmoring Material**. LR 750, Crowthorne, U.K: Transport and Road Research, 1976.
- PONTES FILHO, G. **Estradas de Rodagem: Projeto Geométrico**. São Carlos-SP. 1998. 432 p.: il.
- PRÓ-CONFINS – PROGRAMA PRÓ-CONFINS. Site oficial. Disponível em <www.proconfins.com.br>. 2002.
- OLIVEIRA, A. M. S. & BRITO, S. N. A. (E.) **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE. Editora PINI. São Paulo-SP, 1998.
- RAMALHO, G.G.C.; CALIJURI, M.L.; RIOS, L. **Ouro Preto: Centro Potencial para Implantação de um Sistema de Informações Geográficas**. In: GIS BRASIL 94 – Congresso e Feira para usuários de geoprocessamento. Curitiba (PR). 1994.
- RAMOS, R.A.R. & MENDES, J.F.G. **Avaliação da Aptidão do Solo para Localização Industrial: O Caso de Valença**. Revista Engenharia Civil, 10(10), 7-29. 2001.
- REIS, R.M.M. & SANTO, N.R.E. **Tecnologia de Ponta para Prolongar a Vida dos Pavimentos Asfálticos**. Ipiranga Asfalto S.A. 3ª. Edição. São Paulo-SP. 1999. 71p.
- SENÇO, W. **Estradas de Rodagem - Projeto**. Grêmio Politécnico, Universidade de São Paulo. 1980.
- SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. Editora PINI. São Paulo, SP. 1999.
- SOARES, V. P. **Notas de Aulas Práticas de ENF 610 – Sensoriamento Remoto**. Apostila. 2000.
- VILELA, M.F. **Usos de Diferentes Métodos de Retificação Geométrica e Classificação Digital de uma Imagem TM/LANDSAT-5**. Viçosa, MG: UFV, 1998. 118p. il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- WEBER, E.; HASENACK, H.; NODARI, F.A.; REICHMANN, N.C. **Análise de Alternativas de Traçado de uma Estrada Utilizando Rotinas de Apoio à Decisão em SIG**. Porto Alegre, RS. Disponível em <www.fatorgis.com.br>. 1998. 9p.