

CARLOS HENRIQUE CRESPO DA SILVA

**IDENTIFICAÇÃO DE FRAGILIDADES AMBIENTAIS NA
BACIA DO RIBEIRÃO SÃO BARTOLOMEU, VIÇOSA-MG
UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO.**

Dissertação 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
2010

CARLOS HENRIQUE CRESPO DA SILVA

**IDENTIFICAÇÃO DE FRAGILIDADES AMBIENTAIS NA
BACIA DO RIBEIRÃO SÃO BARTOLOMEU, VIÇOSA-MG
UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITÉRIO.**

Dissertação 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: 10 de março de 2010.

Prof. Ana Augusta Passos Rezende

Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho

Prof. Gilberto Pessanha Ribeiro

Prof. Jugurta Lisboa Filho

Prof. Carlos Antônio Oliveira Vieira
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por me apoiarem em cada momento, em cada dificuldade e me admirarem em cada nova conquista.

À minha irmã e confidente, com quem sempre posso contar, agradeço o carinho e as palavras sempre tão sinceras.

À Universidade Federal de Viçosa, através do Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do mestrado e, além disso, por possibilitar a utilização dos softwares e demais itens necessários para a confecção deste trabalho.

Ao Professor Orientador Carlos Antônio Oliveira Vieira, pela orientação, incentivo, ética e paciência que demonstrou durante todo o processo de mestrado, além de ser uma grande pessoa na qual procuro me espelhar.

Ao Professor e Co-Orientador Rafael Bastos, por proporcionar o desenvolvimento deste trabalho inserido no projeto Plano de Segurança da Água (PSA) e em cujo orçamento esteve inserida minha bolsa de mestrado. Neste sentido, meus agradecimentos também aos órgãos financiadores do projeto: Ministério da Saúde, US Environmental Protection Agency (EPA) e US Center for Disease Control and Prevention (CDC).

Aos Professores Co-Orientadores Antônio Simões Silva, Dalto Domingos Rodrigues, pelas contribuições acadêmicas e à Nolan Ribeiro Bezerra, pelo grande suporte teórico e prático prestado.

Aos amigos que estiveram presentes em diferentes momentos da minha vida, agradeço a atenção e companheirismo: Patricia Zaccanini Albuquerque, Flavia Lucienne Reis, Graziela Ferreira Costa, Roberta Dias, Andreza Baldessin Costa, Samantha Baldessin Costa, Leandro do Carmo Poletto, Tatiane Assis Vilela, Edneya Gomes e Lucas Borges.

BIOGRAFIA

CARLOS HENRIQUE CRESPO DA SILVA, filho de Ribamar José da Silva e Maria Lucia Crespo da Silva, nasceu em 8 de abril de 1985, na cidade de Santa Bárbara d'Oeste, São Paulo.

Em 2000 iniciou o Curso Técnico Profissionalizante em Agrimensura no Colégio Técnico de Limeira –UNICAMP, Limeira–SP, concluindo o curso em 2002.

Em 2003, ingressou no Curso de Engenharia de Agrimensura na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG, concluindo a graduação em 2007.

Em agosto de 2007, ingressou na pós-graduação através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração em Informações Espaciais e Linha de Pesquisa Sistema de Informações Geográficas, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em 10 de março de 2010.

SUMÁRIO

Lista de abreviaturas e siglas	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de tabelas.....	x
Resumo.....	xi
Abstract	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Qualidade da Água para consumo humano	7
2.2. Planos de Segurança da Água – PSA	9
2.3. Índice de Qualidade da Água.....	10
2.3.1 Índice de Qualidade das Águas da National Sanitation Foundation (IQA – NSF)	11
2.3.2 IAP – Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público....	13
2.4. Mapa de fragilidades ambientais	16
2.5. Camadas de informação utilizadas no mapa de fragilidades ambientais.....	17
2.5.1 Declividade.....	18
2.5.2 Tipo de solo	19
2.5.3 Uso e ocupação da terra.....	21
2.5.4 Fluxo acumulado	21
2.5.5 Distância das fontes de poluição	22
2.6. Análise multicritério	22
2.6.1 Etapas da análise multicritério.....	24
2.6.2 Homogeneização dos critérios.....	25
2.6.3 Ponderação dos critérios.....	27
2.6.3.1 Método baseado no ordenamento dos critérios	27
2.6.3.2 Método da escala diferencial semântica	28
2.6.3.3 Métodos de comparação par a par - MAH.....	29
2.6.3.4 Métodos de comparação par a par - MacBeth	30
2.6.4 Combinação dos critérios	33
2.6.4.1 Combinação Linear Ponderada - WLC	33
2.6.4.2 Média Ponderada Ordenada - OWA.....	34
2.7. A técnica Delphi de consulta a especialistas	36
3. METODOLOGIA.....	39
3.1. Caracterização da área de estudos	39

3.2.	Etapas da Metodologia	46
3.3.	Geração da base de dados	47
3.2.1	Mapa de uso e ocupação	47
3.2.2	Mapa de tipos de solos	48
3.2.3.	Mapa de declividade	48
3.2.4	Mapa de fluxo acumulado	49
3.2.5.	Mapa de distância das fontes de poluição	50
3.4.	Aplicação do método Delphi	53
3.5.	Aplicação da análise multicritério	57
3.6.	Espacialização dos Índices de Qualidade da Água.....	61
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
4.1.	Resultados do método Delphi de consulta a especialistas	64
4.2.	Resultados da aplicação dos diferentes métodos de ponderação	67
4.3.	Mapas dos Critérios	69
4.4.	Mapas de fragilidade	76
4.5.	Mapas dos índices de qualidade da água.....	85
4.6.	Validação dos mapas de fragilidade	88
4.6.1	Relativa ao método de Combinação dos critérios.....	89
4.6.1	Relativa ao método de Ponderação dos critérios	90
4.7.	Avanços em relação a trabalhos anteriores.....	92
4.8.	Dificuldades Encontradas	92
5.	CONCLUSÕES.....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
	ANEXO 1	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APPCC	Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle;
ETA	Estação de Tratamento de Água;
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto;
IAP	Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público;
IQA	Índice de Qualidade da Água;
ISTO	Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas;
MAH	Método da Análise Hierárquica;
MDE	Modelo Digital de Elevação;
OWA	Média Ponderada Ordenada (<i>Ordered Weighted Average</i>);
PFTHM	Potencial de Formação de Trihalometanos;
PSA	Plano de Segurança da Água;
RSB	Ribeirão São Bartolomeu;
SIG	Sistema de Informações Geográficas;
WLC	Combinação Linear Ponderada (<i>Weighted Linear Combination</i>);

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do município de Viçosa-MG e inserção da bacia do Ribeirão São Bartolomeu (RSB) na bacia hidrográfica do Rio Doce.....	5
Figura 2. Curvas médias para cada parâmetro do IQA (Fonte: CETESB, 2007).	12
Figura 3. Curva de qualidade padrão para as variáveis tóxicas inclusas no ISTO (Fonte: CETESB, 2007).	14
Figura 4. Fatores e indicadores que interferem na qualidade das águas de abastecimento (Fonte: Adaptado de BUSCHINELLI <i>et al.</i> , 2004).	18
Figura 5. Passos e informações necessárias para geração de um mapa de Fluxo Acumulado.	21
Figura 6. Combinação entre as três formas de função (monótona crescente, decrescente e simétrica) e os três tipos de função (sigmoideal, J-shaped e linear).	26
Figura 7. Escala de relacionamento de critérios que varia de um a sete, definida por Osgood <i>et. al.</i> (1957) (Fonte: USP, 2008).	28
Figura 8. Escala normalizada de valores a serem aplicados na matriz do MAH de acordo com a importância dos critérios se comparado aos demais.	30
Figura 9. Determinação do nível de impacto relativo de cada critério (CR).	31
Figura 10. Fluxograma do processo interativo Macbeth (Fonte: Adaptado de Costa e Vansnick, 1997).	32
Figura 11. Gráfico de decisão OWA (Fonte: Adaptado de Eastman, 1995).	36
Figura 12. Representação das etapas necessárias para a aplicação do método Delphi. (Fonte: Adaptado de WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000)	37
Figura 13. Hidrografia, localização das estações de tratamento de água e dos pontos de amostragem de água nas bacias do Ribeirão São Bartolomeu e do Rio Turvo Sujo (Fonte: Bastos (2009)).	43
Figura 14. Delimitação das sub-bacias e localização das propriedades rurais, bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2004. Fonte: Dias (2007).	44
Figura 15. Ponto de captação para abastecimento de água da ETA I SAAE e ETA UFV, Viçosa-MG	45
Figura 16. Ilustração esquemática das etapas de execução do estudo.	47
Figura 17. Comando de interpolação TIN, do software Idrisi Andes utilizado para gerar o Modelo Digital de Elevação da bacia do Ribeirão São Bartolomeu.	49
Figura 18. Comando Slope do programa Idrisi Andes utilizado para gerar mapa de declividade em percentual a partir do modelo digital de elevação de determinada região.	49
Figura 19. Representação de uma depressão espúria à esquerda e do mesmo relevo após sua eliminação à direita (POLETO <i>et al.</i> , 2008).	50
Figura 20. (a)- Seleção do módulo <i>Weight</i> dentro da análise multicritério (<i>Decision Wizard</i>) (b)- Seleção do número e dos critérios a serem ponderados.	55
Figura 21. Comando <i>Window</i> para recorte das imagens considerando os extremos considerados.	57

- Figura 22.(a)**- Exemplo de janela solicitando o nome da análise a ser gerada. **(b)**- Exemplo de janela solicitando o objetivo da análise. 58
- Figura 23.(a)**- Exemplo de janela solicitando as restrições que compõe a análise. **(b)**- Exemplo de janela solicitando os critérios e questionando se os mesmos precisam ou não ser convertidos para a lógica *fuzzy*. 59
- Figura 24**- Itens necessários na conversão do mapa de distância para lógica *fuzzy*: tipo de função (crescente ou decrescente), formato da função e pontos de controle. 60
- Figura 25-(a)**. Definição da forma que serão distribuídos os pesos. **(b)**. Inserção dos pesos pré-determinados por um dos métodos de ponderação. 60
- Figura 26**. Mapa de distância dos Currais (Fonte de Poluição), bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 70
- Figura 27**. Mapa de distância das Fossas (Fonte de Poluição), bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 71
- Figura 28**. Mapa de tipos de solos da bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 72
- Figura 29**. Mapa de Declividades percentuais agrupadas por intervalos, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 73
- Figura 30**. Mapa de Fluxo Acumulado de água dividido em classes, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 74
- Figura 31**. Mapa de uso e ocupação da terra gerados através de vetorização da ortomagem, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 75
- Figura 32**. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método de Ordenamento dos Critérios para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 77
- Figura 33**. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método de Ordenamento dos Critérios para geração dos pesos e do método OWA considerando risco máximo para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 78
- Figura 34**. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método de Ordenamento dos Critérios para geração dos pesos e do método OWA considerando máxima compensação dos riscos para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 79
- Figura 35**. Mapa de fragilidade gerados com o emprego do Método da Escala Diferencial Semântica 1 para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 80
- Figura 36**. Mapa de fragilidade gerados com o emprego do Método da Escala Diferencial Semântica 2 para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 81
- Figura 37**. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método da Análise Hierárquica (MAH) 1 para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009. 83
- Figura 38**. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método da Análise Hierárquica (MAH) 2 para geração dos pesos e do método WLC para

	combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.....	84
Figura 39.	Índices médios de qualidade da água (IQA) para as sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, fevereiro a outubro de 2008.....	86
Figura 40.	Índices médios de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público (IAP) para as sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, fevereiro a outubro de 2008.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala de valores do IQA/IAP e suas respectivas classificações. Fonte: adaptado de CETESB (2007)	13
Tabela 2. Escala Semântica de Julgamento MacBeth.	31
Tabela 3. Ranking utilizado no Método do Ordenamento do Critérios	54
Tabela 4. Pesos atribuídos pelo método da Escala Diferencial Semântica.	55
Tabela 5. Tabela de Comparação usando o Método de Análise Hierárquica considerando 5 critérios.	56
Tabela 6. Tabela de Comparação usando o Método de Análise Hierárquica considerando 14 critérios.	56
Tabela 7. Tipo de função e pontos de controle utilizados na transformação dos critérios para fuzzy.	59
Tabela 8. Classes de perigos para a qualidade da água.	61
Tabela 9. Índice de Qualidade da Água - (IQA-NSF) na bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009, Viçosa-MG.	62
Tabela 10. Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público (IAP) na bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu de fevereiro a outubro de 2008, Viçosa-MG.....	62
Tabela 11. Respostas enviadas pelos especialistas na primeira rodada do método Delphi e suas respectivas estatísticas.	65
Tabela 12. Respostas enviadas pelos especialistas na primeira rodada do método Delphi (excluindo o especialista número 7) e suas respectivas estatísticas.	66
Tabela 13. Grau de Perigo e importância atribuído de acordo com o método Delphi.....	67
Tabela 14. Pesos atribuídos pelo método do Ordenamento dos Critérios.....	67
Tabela 15. Pesos atribuídos pelo Método da Escala Diferencial Semântica.....	68
Tabela 16. Resultados do Método de Análise Hierárquica	68
Tabela 17. Comparação dos mapas gerados com os diferentes métodos de combinação de critérios e os mapas de índices de qualidade da água ...	90
Tabela 18. Percentual da distribuição entre as classes de perigo para cada método de ponderação.	91
Tabela 19. Intervalo médio de cada método e percentual de pixels classificados fora do intervalo médio de IQA.....	92

RESUMO

SILVA, Carlos Henrique Crespo da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2010. **Identificação de Fragilidades Ambientais para a Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG utilizando análise multicritério.** Orientador: Carlos Antônio Oliveira Vieira. Co-Orientadores: Antônio Simões Silva e Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para identificação de fragilidades ambientais associadas à qualidade da água para o abastecimento humano, focando a bacia de captação. A metodologia aqui proposta emprega diferentes variáveis (camadas de informação) derivadas do sensoriamento remoto (aquisição da imagem orbital, correções, classificação, entre outros), topografia (obtenção da altimetria), além de coleta de dados em campo (amostras de água) e sua devida espacialização. Com a finalidade de unir todas essas camadas informacionais, de forma a gerar um mapa de fragilidade ambiental, foi empregada a análise multicritério, que estabelece uma relação de preferências entre as variáveis pré-analisadas. Um dos focos desse trabalho é utilizar diferentes métodos de ponderação dessas variáveis de modo a obter um mapa de fragilidade mais coeso com a realidade da região de estudos - Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu – Viçosa, MG- uma vez que esse mapa será validado com informações provenientes da qualidade da água na bacia de captação (turbidez, concentração de nitrogênio e outros elementos químicos e elementos patogênicos). A realização deste trabalho teve como principal motivação as exigências da Portaria 518/204 de implementação de ferramentas de avaliação de risco, o que, entretanto, como destacado por Bastos *et al.* (2007) ainda “não se apresenta sistematizado o suficiente na legislação, de forma que possa ser traduzido em uma ferramenta metodológica de pronta utilização pelos responsáveis dos serviços de abastecimento de água”. Através dos experimentos foi possível determinar regiões que devem sofrer intervenções para redução do risco, que de acordo com o melhor método de ponderação (Método da Análise Hierárquica), essa área é cerca de 3% da bacia de contribuição, compostos em sua maioria por solo exposto e áreas urbanizadas, além de grande concentração de criadouros de animais e lançamento de esgoto em seu entorno.

ABSTRACT

SILVA, Carlos Henrique Crespo da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2010. **Environmental Vulnerability Identification for Ribeirão São Bartolomeu basin, Viçosa-MG using Multi-criteria analysis.** Adviser: Carlos Antônio Oliveira Vieira. Co-Advisers: Antônio Simões Silva and Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

This work introduces a methodical approach to obtain environmental vulnerability maps associated with the water quality for human supply, focusing on water basins. The methodology proposed uses different variables (layers of information) derived from remote sensing (acquisition of orbital imaging, correction, classification, etc.), topography (obtained from altimetry), including field data collection (water samples) and its proper spatialization. With the aim of uniting all these informational layers, generating a map of environmental vulnerability, a multi-criteria analysis was used, which establishes a list of preferences among the variables pre-analyzed. One of the focuses of this work is to use different weighting methods for these variables in order to obtain a vulnerability map which is more coherent with the reality of the region studied (Ribeirão São Bartolomeu basin - Viçosa, MG), since that map will be validated with the data collected from the water quality in the basin (turbidity, nitrogen concentration and physical, chemical and pathogenic elements).

This work had as main motivation the requirements of Decreto 518/204 of implementing tools for risk assessment, which however, as highlighted by Bastos *et al.* (2007) still not presented systematic enough in the legislation, so that it can be translated into a methodological tool for ready use by those responsible services of water supply. Through the experiments was possible to determine which regions must undergo interventions to reduce risks, which according to the best weighting method (Method of Analysis Hierarchical), this area is about 3% of the basin contribution, it's made up mainly by exposed soil and urbanized areas, besides a large concentration of animal breeding and release of raw sewage surround this area.

1. INTRODUÇÃO

Uma das marcas do mundo contemporâneo, como resultado da concentração demográfica, da expansão industrial e das atividades agropecuárias, tem sido o registro de intensos conflitos pelo uso da água. A tênue linha que separa os usos múltiplos e conflitantes requer racionalidade no uso da água, o que inclui necessariamente disciplina de uso, preservação da qualidade da água, controle de perdas e desperdícios e reciclagem (BASTOS e MARQUES, 2003).

Para que se alcance o desejado manejo integrado dos recursos hídricos e a preservação do uso da água para abastecimento para consumo humano é necessário conhecer todo o sistema de abastecimento de água, além da região de sua inserção porque, segundo Calijuri (1999), o uso e a ocupação da terra nas bacias de drenagem (bacia a montante dos pontos de captação, foco deste trabalho) são fatores que determinam a qualidade da água nos mananciais de abastecimento. Adicionalmente, deve-se obter informações referentes à qualidade da água que entra e sai no sistema de abastecimento, uma vez que, de acordo com Jong *et al.* (1995), o monitoramento da qualidade da água registra as variações espaço-temporal e relaciona o sistema hídrico com toda a sua bacia de drenagem.

Há indissociabilidade entre a qualidade da água bruta e a tratada/distribuída para consumo e, portanto, a importância da proteção e do monitoramento do manancial de abastecimento é reconhecida e destacada na legislação brasileira de qualidade da água para consumo humano, a Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, de 25 de março de 2004, que “estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade” (BRASIL, 2004). Por exemplo, no Artigo 9º da Portaria 518/2004, dentre as atribuições dos responsáveis pela operação de sistemas de abastecimento de água, encontra-se:

“manter e controlar a qualidade da água produzida e distribuída, por meio de análises laboratoriais da água, em amostras

provenientes das diversas partes que compõem o sistema de abastecimento.”

“manter avaliação sistemática do sistema de abastecimento de água, sob a perspectiva dos riscos à saúde, com base na ocupação da bacia contribuinte ao manancial, no histórico das características de suas águas, nas características físicas do sistema, nas práticas operacionais e na qualidade da água distribuída.”

“promover, em conjunto com os órgãos ambientais e gestores de recursos hídricos, as ações cabíveis para a proteção do manancial de abastecimento e de sua bacia contribuinte, assim como efetuar controle das características das suas águas, notificando imediatamente a autoridade de saúde pública sempre que houver indícios de risco à saúde ou sempre que amostras coletadas apresentarem resultados em desacordo com os limites ou condições da respectiva classe de enquadramento, conforme definido na legislação específica vigente”.

No Artigo 7º da Portaria 518/2004, que trata das atribuições dos responsáveis pela Vigilância da Qualidade da Água para consumo humano (as Secretarias de Saúde), encontra-se (BRASIL, 2004):

“sistematizar e interpretar os dados gerados pelo responsável pela operação do sistema de abastecimento de água, assim como pelos órgãos ambientais e gestores de recursos hídricos, em relação às características da água nos mananciais, sob a perspectiva da vulnerabilidade do abastecimento de água quanto aos riscos à saúde da população”.

“efetuar, sistemática e permanentemente, avaliação de risco à saúde humana em cada sistema de abastecimento, por meio de informações sobre: a) a ocupação da bacia contribuinte ao manancial e o histórico das características de suas águas; b) as características físicas dos sistemas, práticas operacionais e de

controle da qualidade da água; c) o histórico da qualidade da água produzida e distribuída; d) a associação entre agravos à saúde e situações de vulnerabilidade do sistema.”

Do exposto, torna-se patente o enorme potencial de aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o gerenciamento de recursos hídricos em bacias de captação de abastecimento de água para consumo humano. SIG são ferramentas computacionais do geoprocessamento, as quais unem informações tabulares a uma base de dados espaciais de forma eficiente e rápida, possibilitando seqüencialmente várias análises conjuntas e complexas (DORCAL *et al.*, 2008).

Com o emprego de SIG é possível gerar um mapa de fragilidade da bacia de captação e de um manancial de abastecimento, com vistas a representar a suscetibilidade da bacia à introdução de perigos no sistema de abastecimento. Segundo Kawakubo *et al.* (2005), o mapa de fragilidade é uma das principais ferramentas utilizadas no planejamento territorial ambiental, subsidiando/facilitando o processo de tomada de decisão.

‘Fragilidade’ é o termo mais usual na área de planejamento ambiental utilizado para representar o que a área de saúde e, recentemente a área de Engenharia Sanitária, usualmente chamam de ‘eventos perigos’, que segundo Bastos *et al.*, (2009) corresponde as situações que possam levar a introdução de ‘perigos’, cujo conceito compreende as propriedades inerentes a um agente (químico, físico ou biológico), que em uma condição de exposição pode implicar em um efeito adverso a saúde. Adicionalmente, se faz importante conceituar ‘risco’, que representa a probabilidade de um evento (no caso, efeito adverso a saúde) ocorrer.

Segundo Bastos *et al.*, (2009), a presença de organismos patogênicos ou substâncias químicas na água para consumo humano seriam exemplos de ‘perigo’; o consumo da água (exposição), que pode levar a ocorrência de efeito adverso, representando ‘risco’; enquanto a existência de exploração agrícola na bacia de contribuição, descarga de esgotos sanitários ou efluentes agroindustriais no manancial de águas brutas, falhas no tratamento da água e ruptura da rede de distribuição significam ‘eventos perigosos’, os quais podem introduzir perigos que podem estar associados a efeitos adversos a população consumidora.

É importante salientar que a análise da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas está inserida em um contexto muito peculiar, porque se trata de uma região com limites definidos e que apresenta uma dinâmica intensa de uso e ocupação da terra, sendo que a água superficial é o principal indicador de qualidade do sistema (SANTOS e VITTE, 1998).

A geração de um mapa de fragilidades demanda inicialmente a definição de várias camadas básicas de informação (tais como relevo, tipo de solo, geologia, uso e ocupação da terra e cobertura vegetal), as quais, analisadas de forma integrada, fornecem informações espacializadas sobre diferentes graus de fragilidade existentes na bacia de captação (KAWAKUBO *et al.*, 2005).

Na etapa de integração dessa base de dados, a ser realizada via análise multicritério, procede-se à ponderação condicional das diferentes camadas de informações. Existem vários métodos para se fazer tal ponderação, sendo desejável escolher aquele que melhor retrate a realidade de cada estudo de caso, gerando então um mapa de fragilidade mais consistente e possibilitando a tomada de decisões e intervenções mais adequadas.

Com base no exposto, o objetivo do presente trabalho é apresentar uma proposta metodológica para obtenção de mapas de fragilidade¹ ambiental associados à qualidade da água para abastecimento humano, focando a bacia de captação, utilizando análise multicritério em ambiente SIG. O estudo de caso foi desenvolvido na bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu - RSB (Figura 1), manancial de abastecimento de água para consumo humano no município de Viçosa, Zona da Mata Norte, do estado de Minas Gerais.

¹ Optou-se por adotar o termo 'mapa de fragilidade' em fidelidade a linguagem mais usual na área de planejamento ambiental. Porém, na linguagem mais usual na área da saúde, mais recentemente incorporada pela área da Engenharia Sanitária, o objetivo deste trabalho poderia ser interpretado como 'mapa de perigos'.

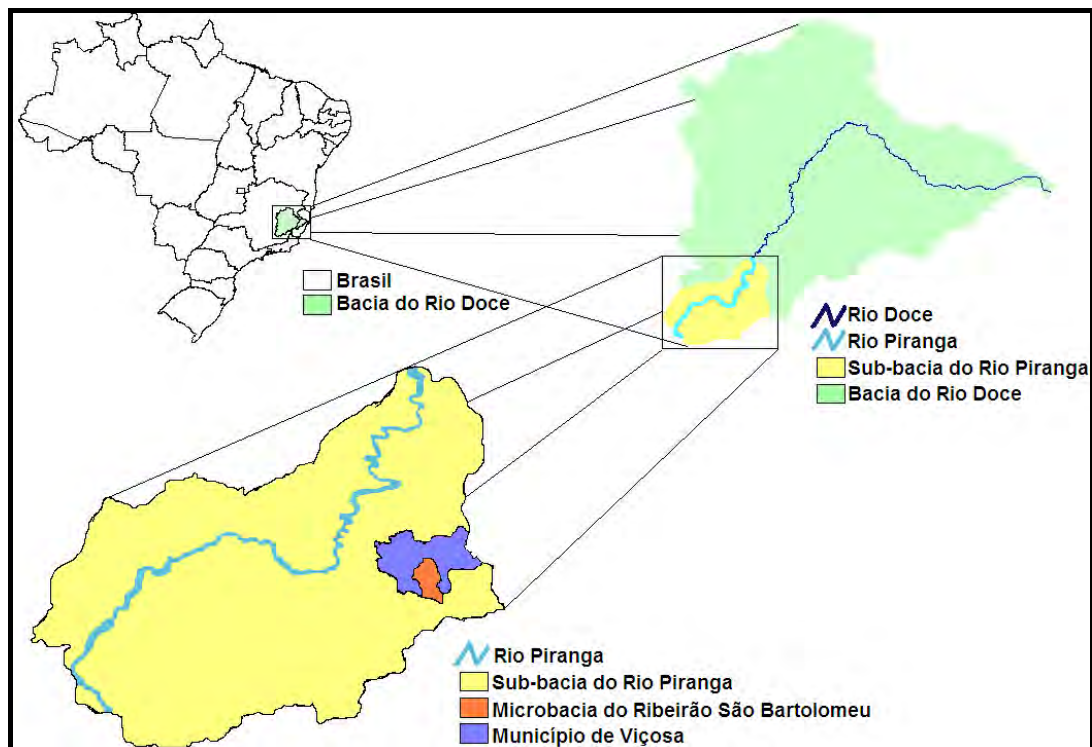


Figura 1. Localização do município de Viçosa-MG e inserção da bacia do Ribeirão São Bartolomeu (RSB) na bacia hidrográfica do Rio Doce.

A realização deste trabalho teve como principal motivação as já referidas exigências da Portaria 518/2004 de implementação de ferramentas de avaliação de risco, o que, entretanto, como destacado por Bastos *et al.* (2007), ainda “não se apresenta sistematizado o suficiente na legislação, de forma que possa ser traduzido em uma ferramenta metodológica de pronta utilização pelos responsáveis pelos serviços de abastecimento de água”.

Os principais beneficiados desta pesquisa são os gestores/responsáveis dos sistemas de tratamento/abastecimento de água, uma vez que a metodologia aqui proposta possui aplicabilidade na gestão municipal e é de viável implantação dentro dos órgãos responsáveis pela água.

O trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto ‘Plano de Segurança da Água’, financiado pelo Ministério da Saúde, pelas agências norte americanas *US Center for Disease Control and Prevention (CDC)* e *US Environmental Protection Agency (USEPA)*, e desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa em parceria com o Serviço Autônomo de Água e Esgotos de Viçosa (SAAE Viçosa).

O objetivo específico do trabalho foi aplicar/verificar diferentes métodos de ponderação utilizados no tipo de análise em questão e definir qual deles, e sob quais condições, melhor descreve a área de estudo.

Esta dissertação é composta por cinco capítulos: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia, Resultados e, finalmente, Conclusões e Recomendações.

O primeiro capítulo introduz sinteticamente o problema e situação atual da água no Brasil, enfoca a Portaria 518/2004 e a dificuldade em aplicar ferramentas de avaliação de risco devido à falta de uma estrutura sistemática pré-definida.

O segundo capítulo tem por objetivo aprofundar o conhecimento do leitor nos campos do conhecimento necessários para compor esta tese, além de mostrar a importância das informações empregadas na confecção do trabalho e fortificar as motivações para o desenvolvimento desta metodologia.

O capítulo três apresenta as etapas metodológicas para a obtenção dos resultados e conseqüentemente, retrata a proposta metodológica a ser seguida para geração dos mapas de fragilidade, além de mostrar os comandos, ferramentas e manipulações necessárias (em nível de detalhes).

O capítulo que trata dos Resultados apresenta os mapas gerados, os valores obtidos através da consulta feita a especialistas, além de fazer análises sobre todo o material gerado.

Em Conclusões e Recomendações podem ser encontradas as principais dificuldades e problemas na execução desta metodologia, uma análise mais aprofundada do material gerado, além de recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Qualidade da Água para consumo humano

Até o final do século XIX, a qualidade da água para fins de consumo humano era analisada simplesmente por suas características estéticas. Após a ocorrência de vários surtos de doenças, cuja transmissão era dada pela água, a partir do século XX se tornou evidente a necessidade de definir água potável para consumo humano a partir de recursos técnicos e posteriormente legais (VIEIRA e MORAES, 2005). Desse modo, a qualidade da água para consumo humano passou a ser vinculada a concentrações máximas permitidas para diferentes contaminantes ou indicadores de qualidade da água (de natureza, química, física e microbiológica), que em conjunto, definem um padrão de potabilidade.

O padrão de potabilidade brasileiro é estabelecido em legislação federal (Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde) (BRASIL, 2004), sendo composto por: (i) padrão microbiológico; (ii) padrão de turbidez para a água pós-filtração ou pré-desinfecção; (iii) padrão para substâncias químicas que representam riscos à saúde (inorgânicas, orgânicas, agrotóxicos, desinfetantes e produtos secundários da desinfecção); (iv) padrão de radioatividade; (v) padrão de aceitação para consumo humano (substâncias que pode provocar rejeição ao consumo, devido aos aspecto estético da água, sabor ou odor). A potabilidade da água é aferida pelo atendimento, em simultâneo, dos valores máximos permitidos (VMP – concentrações limite) estabelecidos para cada parâmetro.

Porém, a garantia da qualidade da água para consumo humano passa por uma revisão conceitual hoje em dia, uma vez reconhecido que os mecanismos de controle laboratorial, embora indispensáveis, não são suficientes para assegurá-la (BASTOS *et al.*, 2007). Segundo Bastos *et al.* (2009), as insuficiências no controle laboratorial podem ser justificadas pelos seguintes motivos:

- 1) A amostragem para monitorar a qualidade da água é baseada em princípios estatísticos/probabilísticos, ou seja, inevitavelmente há uma margem de erro e/ou incerteza;
- 2) As técnicas de análise requerem tempo de resposta, portanto o conhecimento da qualidade da água não ocorre em tempo real;
- 3) Os limites adotados internacionalmente para a concentração de substâncias químicas, geralmente surgem de estudos toxicológicos e epidemiológicos de alto grau de incerteza e, associado à falta de dinamismo e de velocidade de alteração da legislação existente para modificar tais parâmetros, acarreta numa qualidade de água associada não satisfatória;
- 4) No controle microbiológico da qualidade da água, geralmente, recorre-se ao emprego de organismos indicadores, devido a fatores financeiros, limitações técnico-analíticas e a necessidade de respostas rápidas, porém, não há organismos que revelem a presença/ausência de toda gama de patógenos que podem ser encontrados na água.

Assim, nos últimos anos tem sido privilegiado o conceito de ‘segurança’ da água para consumo humano¹ implicando que, além de satisfazer padrões de qualidade estabelecidos legalmente, os sistemas de abastecimento devem apresentar níveis de desempenho que garantam sua segurança, evitando vulnerabilidades que possam impor risco à saúde (Bastos *et al.*, 2007).

Dessa forma, a aplicação integrada de ferramentas de avaliação e gerenciamento de riscos, desde a captação até o consumo é reconhecida na terceira edição dos Guias da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre Qualidade da Água para Consumo Humano (WHO, 2006) como a forma mais efetiva de assegurar

¹ Água segura para consumo humano é definida pela OMS como aquela que não apresente risco significativo à saúde ao longo do consumo por toda a vida, incluindo as diferentes sensibilidades que podem ocorrer durante os distintos estágios de vida (WHO,2006). Como destacado por Bastos *et al.*, (2007), é importante assinalar que a definição de água potável na Portaria 518/2004 (“água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde”) aproxima-se do conceito de segurança da água para consumo humano assumido pela OMS.

a segurança da água para consumo humano (BASTOS *et al.*, (2009). A OMS sistematiza esse tipo de abordagem nos chamados Planos de Segurança da Água (*Water Safety Plans*) (WHO, 2006)

2.2. Planos de Segurança da Água – PSA

Os Planos de Segurança da Água (PSA) podem ser vistos como um instrumento que identifica e prioriza perigos e riscos em um sistema de abastecimento de água, desde o manancial até o consumidor, de modo a delinear medidas para controlar ou eliminar os perigos e minimizar riscos; os PSA promovem ainda processos para averiguação continuada da eficácia dos sistemas no fornecimento de água segura para consumo humano (WHO, 2006).

Assim, objetivando diminuir a probabilidade de falhas, os PSA geram um sistema organizado e estruturado, cuja finalidade é prevenir possíveis falhas, tanto em situações normais de operação, quanto de emergência. Em outras palavras, os PSA trazem uma abordagem preventiva relacionada à segurança da água para consumo humano, visando de forma contínua o controle da contaminação dos mananciais, a otimização dos processos de tratamento e a minimização da probabilidade de contaminação da água nos sistemas de distribuição (WHO, 2006).

Os elementos básicos do PSA estão baseados nos princípios e conceitos de múltiplas barreiras, análise de perigos e pontos críticos de controle (APPCC), avaliação e gestão de risco e gestão de qualidade (BASTOS *et al.*, 2007). Resumidamente, um PSA inclui os seguintes componentes principais: (i) avaliação do sistema; (ii) monitoramento do sistema; (iii) implementação de planos de gestão.

A avaliação do sistema deve partir de diagnóstico, o mais detalhado possível, do manancial aos pontos de consumo, e tem por objetivo verificar se o mesmo, tal como se encontra, assegura a produção e abastecimento de água segura para consumo humano. Essa etapa inclui, portanto, a identificação de **pontos vulneráveis** (perigos e pontos críticos), a caracterização de riscos e, na seqüência, a especificação de medidas de controle (WHO, 2006).

Especificamente em relação à bacia de captação do manancial de abastecimento, como informações importantes para essa detalhada descrição do

sistema de abastecimento de água podem ser citadas (WHO, 2006): (i) hidrologia e geologia; (ii) informações meteorológicas; (iii) usos conflitantes da água; (iv) uso e ocupação da terra; (v) fontes pontuais e difusas de poluição – atividades agropecuárias, esgotos sanitários, dejetos de animais, etc.; (vi) descrição do manancial; (vii) qualidade da água, características físicas, vazões, medidas de proteção, etc.; (viii) políticas e medidas existentes de proteção de mananciais e conservação de recursos hídricos.

A especificação de **medidas de controle** para os perigos identificados deve ser acompanhada da prescrição de protocolos de monitoramento, de forma que qualquer desvio do desempenho (ou situação) desejado possa ser prontamente corrigido.

Por fim, o estabelecimento de **planos de gestão** inclui: a documentação do diagnóstico e da avaliação do sistema de abastecimento de água, a descrição das rotinas de operação e monitoramento (para períodos de operação normal ou em condições incidentais), planos de comunicação interna e externa (por exemplo, aos responsáveis pela vigilância da qualidade da água e ao público consumidor).

2.3. Índice de Qualidade da Água

A qualidade da água pode ser mensurada por parâmetros físicos, químicos e biológicos, os quais podem ser utilizados para classificar as águas em diferentes categorias de uso, tal como na Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 que “*dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes*” (BRASIL, 2005). Entretanto, tais sistemas de classificação consideram cada parâmetro de qualidade de forma isolada.

De forma a agregar informações diversas em único número que expresse o estado da qualidade da água, vários ‘Índices de Qualidade da Água’ tem sido propostos. Em que pesem as limitações de síntese de um fenômeno tão complexo (a dinâmica da qualidade da água), tais índices apresentam como grande virtude a facilidade de comunicação com público leigo, além de constituírem ferramenta ágil de gestão de recursos hídricos. Por outro lado, apesar de fornecerem uma avaliação integrada, os ‘Índices’ não substituem de todo uma avaliação detalhada da qualidade das águas de uma determinada bacia hidrográfica (CETESB, 2007).

No campo específico do abastecimento de água para consumo humano, um dos índices mais difundidos é o IQA (Índice de Qualidade da Água), desenvolvido na década de 1970 pela National Sanitation Foundation Institution (EUA), com a finalidade de aferir a tratabilidade de água, posteriormente ampliado em seu enfoque pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) com o desenvolvimento do IAP (Índice de qualidade de água bruta para fins de abastecimento público) (CETESB, 2007).

2.3.1 Índice de Qualidade das Águas da National Sanitation Foundation (IQA – NSF)

Como referido, o IQA foi desenvolvido na década de 1970, nos Estados Unidos pela "*National Sanitation Foundation*" (por isso também conhecido como IQA-NSF). A criação do IQA baseou-se numa pesquisa de opinião junto a especialistas em qualidade de águas, que indicaram os parâmetros a serem avaliados, o peso relativo dos mesmos e a condição com que se apresenta cada parâmetro, segundo uma escala de valores "*rating*". Dos 35 parâmetros indicadores de qualidade de água inicialmente propostos, nove foram selecionados: quantidade de oxigênio dissolvido, fósforo total, nitrogênio total, coliformes fecais, pH, DBO, temperatura, turbidez e resíduo total. Para estes, a critério de cada profissional, foram estabelecidas curvas de variação da qualidade das águas de acordo com o estado ou a condição de cada parâmetro. Estas curvas de variação, sintetizadas em um conjunto de curvas médias para cada parâmetro, bem como seu peso relativo correspondente, são apresentados na Figura 2 (CETESB, 2007).

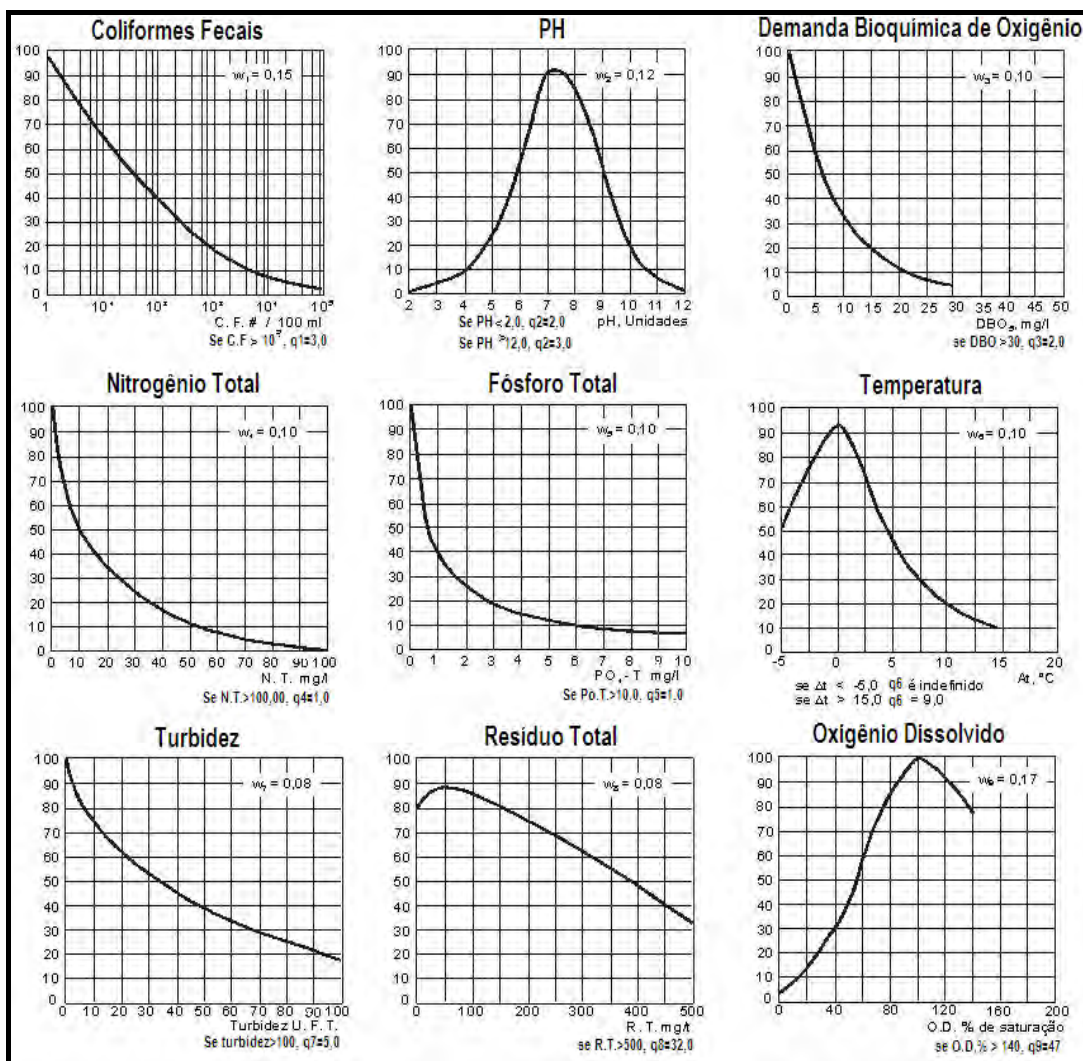


Figura 2. Curvas médias para cada parâmetro do IQA
(Fonte: CETESB, 2007).

Baseado nestas curvas, o IQA pode ser obtido pelo produtório ponderado dos diferentes fatores como mostra a Equação 1 (sendo todos parâmetros indispensáveis para sua obtenção).

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Onde:

IQA : Índice de Qualidade da Água, varia entre 0 e 100;

q_i : qualidade do i-ésimo parâmetro, variando entre 0 e 100, obtido da respectiva "curva média de variação de qualidade", de acordo com sua concentração ou medida;

w_i : peso associado ao i -ésimo parâmetro, varia entre 0 e 1, em função da sua importância para a conformação global de qualidade, sendo que:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Onde: n : número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

A cada faixa de valores obtidos para o IQA (na escala de 0 a 100) associa-se uma categoria de qualidade da água, usualmente também representada na forma de cores padronizadas (Tabela 1).

Tabela 1. Escala de valores do IQA/IAP e suas respectivas classificações. Fonte: adaptado de CETESB (2007)

VALOR IQA/IAP	QUALIFICAÇÃO	COR
80- 100	ÓTIMA	AZUL
52-79	BOA	VERDE
37-51	ACEITÁVEL	AMARELA
20-36	RUIM	VERMELHA
0-19	PÉSSIMA	ROXA

2.3.2 IAP – Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público

Com vistas a superar algumas das limitações do IQA (por exemplo, o fato de não incorporar substâncias tóxicas), a CETESB desenvolveu o Índice de Qualidade da Água Bruta para Fins de Abastecimento Público (IAP), de acordo com a Equação 2:

$$\boxed{\text{IAP} = \text{IQA} \times \text{ISTO}} \quad (2)$$

Onde:

IAP: Índice de Qualidade da Água Bruta para Fins de Abastecimento Público

IQA: Índice de Qualidade da Água, conforme Equação 1

ISTO: Índice de substâncias tóxicas e organolépticas

O 'ISTO' é um índice composto por um grupo de substâncias tóxicas e de substâncias que afetam a qualidade organoléptica da água, a saber, (CETESB, 2007):

a) **ST:** grupo de variáveis que indicam a presença de substâncias que geram riscos a saúde (Teste de Ames - Genotoxicidade, Potencial de Formação de Trihalometanos - PFTHM, Número de Células de Cianobactérias, Cádmio, Chumbo, Cromo Total, Mercúrio e Níquel)¹;

b) **SO:** Grupo de variáveis que afetam a qualidade organoléptica (Ferro, Manganês, Alumínio, Cobre e Zinco).

Conforme definido pela CETESB (2007), para cada parâmetro incluído no grupo de ST são estabelecidas curvas de qualidade a atribuídas ponderações variando de 0 a 1.

As curvas de qualidade para essas variáveis foram construídas entre dois níveis de qualidade extremos (q_i): (i) limite inferior (LI), baseado nos padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria 518/04 do Ministério da Saúde, e ao qual é atribuído valor numérico 1,0; (ii) limite superior (LS), baseado nos padrões de qualidade de água doce Classe 3 da Resolução CONAMA 357/2005, e ao qual é atribuído valor numérico 0,5.

Através dessas curvas determina-se o índice de qualidade da água normalizado (q_i) para cada um desses parâmetros (Figura 3). Na qual, se o Valor Medido \leq LI: $q = 1$; senão, $q = 0,5 \text{ (Valor Medido - LI) / (LS - LI)}$.

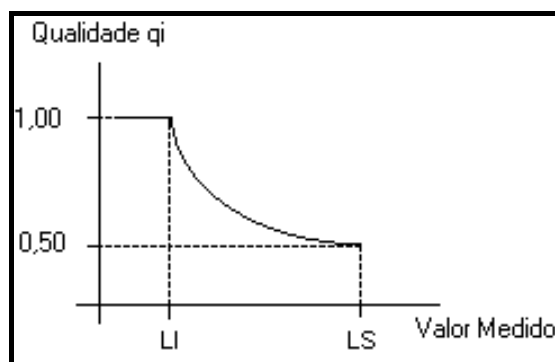


Figura 3. Curva de qualidade padrão para as variáveis tóxicas incluídas no ISTO (Fonte: CETESB, 2007).

¹ As variáveis ‘teste de Ames (qTA)’ e o ‘Número de Células de Cianobactérias’ não foram consideradas no presente trabalho. Os critérios para a definição dos valores numéricos referentes a essas variáveis estão descritos em CETESB (2007).

As faixas de variação de qualidade (qi), que são atribuídas aos valores medidos para o potencial de formação de trihalometanos e para os metais que compõem o ISTO, refletem as seguintes condições de qualidade da água bruta destinada ao abastecimento público (CETESB, 2007):

- Valor medido \leq LI: águas adequadas para o consumo humano, pois os valores medidos se adequam aos padrões de potabilidade estabelecido pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

- LI < Valor medido \leq LS: águas adequadas para tratamento convencional, pois os valores medidos se adequam aos padrões de qualidade da classe 3 da Resolução CONAMA 357/05.

- Valor medido > LS: águas que não devem ser submetidas apenas a tratamento convencional, pois os valores medidos não se adequam aos padrões de qualidade da classe 3 da Resolução CONAMA 357/2005.

A ponderação do componente ST (grupo de substâncias tóxicas) do ISTO é então obtida pela Equação 3, que representa a multiplicação dos dois valores mínimos mais críticos do grupo de variáveis que indicam a presença dessas substâncias na água:

$$\mathbf{ST = (1^{\circ}\text{Mín-mais crítico})x(2^{\circ}\text{Mín-mais crítico})} \quad (3)$$

Por sua vez, a ponderação do componente SO (substâncias que afetam a qualidade organoléptica da água) pode ser obtida por meio da Equação 4, que representa a média aritmética dos valores de qualidade padronizados (qi) desse grupo de substâncias:

$$\mathbf{SO = média aritmética (qAl;qCu; qZn; qFe; qMn)} \quad (4)$$

O ISTO é então obtido pelo produto dos componentes relativos ao grupo de substâncias tóxicas e ao grupo substâncias que afetam a qualidade organoléptica da água (Equação 5):

$$\text{ISTO}=\text{STxSO} \quad (5)$$

Por fim, o IAP é obtido por meio da Equação 2. A classificação do IAP segue a mesma lógica da classificação do IQA, como mostrado na Tabela 01 (CETESB, 2007).

2.4. Mapa de fragilidades ambientais

‘Fragilidade’ é o termo mais usual na área de planejamento ambiental utilizado para representar o que a área de saúde e, recentemente a área de Engenharia Sanitária, usualmente chamam de ‘eventos perigos’, que segundo Bastos *et al.*, (2009) corresponde as situações que possam levar a introdução de ‘perigos’, cujo conceito compreende as propriedades inerentes a um agente (químico, físico ou biológico), que em uma condição de exposição pode implicar em um efeito adverso a saúde.

De acordo com Spör e Ross (2004), o meio ambiente possui maior ou menor fragilidade relacionada às modificações inseridas pelo ser humano. Em outras palavras, uma modificação em qualquer um dos componentes naturais (sejam eles: clima, recursos hídricos, relevo, solo e vegetação) implica ruptura do estado de equilíbrio pré-existente na natureza, comprometendo o adequado funcionamento do sistema.

Desta forma, um mapa de fragilidades ambientais objetiva agrupar regiões de acordo com suas características, através da junção de áreas com características relativamente homogêneas (SEMA, 1985). Spör e Ross (2004) afirmam que o mapa de fragilidade integra as variáveis naturais e antrópicas a fim de gerar um diagnóstico das múltiplas categorias de fragilidade existentes no ambiente. Além disso, o mapa de fragilidade pode ser visto como um meio de compreender as individualidades de cada região de modo a propor diferentes usos, visando o melhor aproveitamento dos potenciais naturais existentes e também compreender a dinâmica de funcionamento dessas áreas, tratadas como um organismo único e permeado por interconexões (PIVELLO *et al.*, 1998).

Depreende-se, assim, que o mapa de fragilidade ambiental é um instrumento de extrema importância para o planejamento territorial ambiental (reconhecido pela Lei Federal nº 6.938/81), e vem, de fato, sendo muito utilizado para este fim

(KAWAKUBO *et al.*, 2005). Segundo Spör e Ross (2004), a identificação das fragilidades do ambiente proporciona melhor delineamento das diretrizes e ações a serem tomadas, além de fornecer subsídios à gestão do território, ou seja, contribui para disciplinar o uso e ocupação da terra, solucionar conflitos e organizar o território (PIVELLO *et al.*, 1998).

Em primeiro instante, há necessidade de obter informações, dentre outros condicionantes/fatores, como o clima, o relevo, a geologia, o solo, o uso e ocupação da terra, a fim de gerar um mapa de fragilidade. Sequencialmente essas informações são integradas, gerando então uma síntese que expressa os diferentes graus de fragilidade do ambiente em função de suas características (KAWAKUBO *et al.*, 2005).

2.5. Camadas de informação utilizadas no mapa de fragilidades ambientais

Arêdes e Coelho (2005) abordam a pertinência de adotar a bacia hidrográfica como unidade estratégica de planejamento nos estudos dos recursos hídricos, através de uma visão sistêmica, ou seja, integrando os diferentes fatores presentes na bacia inter-relacionados e interdependentes. Com base nesse princípio, torna-se necessário reunir informações referentes ao meio biofísico e sócio organizacional, para se considerar de forma integrada as restrições, suscetibilidades e vocação do uso da terra, urbano e rural, otimizando seu uso, minimizando os impactos ambientais e alterando o mínimo possível o frágil equilíbrio dinâmico dos sistemas como um todo.

Pode-se concluir que o diagnóstico da bacia obtido através de informações integradas sobre processos naturais e do uso da terra na mesma, permite a compreensão das relações existentes e, além disso, possibilita a tomada de ações mitigadoras a fim de manter a qualidade da água dos mananciais de abastecimento de água.

Esse item será desenvolvido, entretanto, com atenção específica às variáveis selecionadas neste trabalho para compor o mapa de fragilidade ambiental, relacionadas (ou relacionáveis) à qualidade da água superficial. Essencialmente, foram selecionadas variáveis representativas dos recursos naturais presentes de atividades antrópicas na área de estudo.

Segundo Buschinelli *et al.* (2004), e como ilustrado na Figura 4, os agentes naturais influenciam fatores como erosão, carreamento de partículas aos cursos d'água e a velocidade com que ocorre tal carreamento, enquanto fatores antrópicos geram poluição, erosão e alterações no ambiente em que se insere, ou seja, os agentes antrópicos modificam os agentes naturais, enquanto os agentes naturais influenciam o tipo de atividade antrópica a ser desenvolvida em dada região

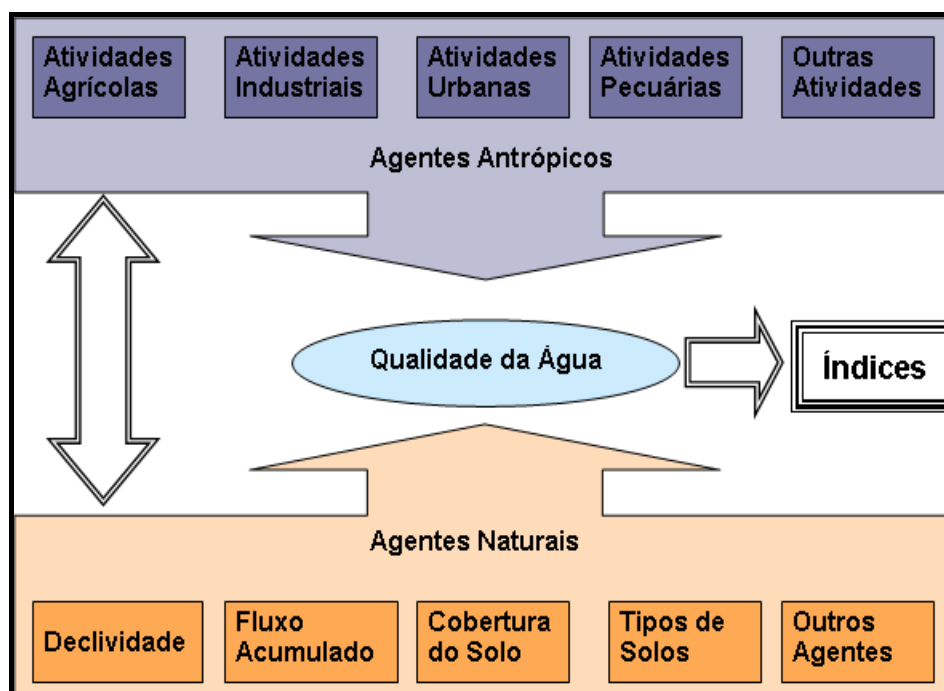


Figura 4.Fatores e indicadores que interferem na qualidade das águas de abastecimento

(Fonte: Adaptado de BUSCHINELLI *et al.*, 2004).

Farias (2006) sugere que os critérios a serem adotados para elaboração do mapa de fragilidade em bacias hidrográficas incluem: i) Declividade, ii) Solos, iii) Uso e ocupação, iv) Drenagem, v) Clima; vi) área urbana e/ou taxa de urbanização; vii) Distâncias das fontes potenciais de poluição; viii) qualidade da água.

2.5.1 Declividade

A declividade é definida como a relação entre a diferença de nível (altura, cota ou altitude) existente entre dois pontos e a respectiva distância horizontal entre eles (IBGE, 2006), podendo ser medido em porcentagem ou em graus (INPE, 2000).

Para Souza *et al.* (2005), a declividade revela o comportamento do relevo na região e é um elemento de suma importância na determinação da fragilidade ambiental. Áreas com declividade elevadas, associadas a outros fatores, estão mais propensas a serem erodidas. Donzeli *et al.* (1996), utilizou a USLE – Equação Universal de Perda de Solo (WISCHMEIER e SMITH, 1978, citados por DONZELI *et al.*, 1996) para grandes e micro bacias hidrográficas, relacionando esses dois fatores de forma satisfatória.

A erosão gera problemas de aporte elevado de material em suspensão, assoreamento de corpos hídricos, redução da profundidade da camada eutrófica (camada onde se concentram os nutrientes) e conseqüentemente, modificação da qualidade da água. Streher e Schäfer (2007) demonstraram que a declividade possui influência na determinação dos índices químicos de qualidade da água, fato comprovado estatisticamente via regressão linear.

2.5.2 Tipo de solo

O solo é a base do ambiente onde ocorrem diversas relações naturais e humanas; é um corpo formado por processos físicos, químicos e biológicos, cujos agentes de formação são basicamente o clima, os fatores topográficos e a comunidade biótica e cujo material de origem é a rocha subjacente (EMBRAPA, 2003).

Segundo Silva *et al.* (2003), o solo é constituído por partículas minerais e orgânicas e por organismos de diversos grupos biológicos, além de conter, na maioria dos casos, água e gases. O tipo de solo varia com as condições ambientais (clima, organismos, material de origem, tempo) numa escala continental ou local. Em função dessas condições, na paisagem encontram-se diversos tipos de solos com características diferenciadas, expressas por suas propriedades, que influenciam a resistência ao processo erosivo, no qual o solo é considerado um agente passivo.

De acordo com Souza *et al.* (2005), a identificação da ocorrência e da distribuição das várias classes de solo na paisagem torna possível um conjunto de inferências, principalmente no que tange à ação de processos erosivos, infiltração de água e outros. Para isso são utilizadas algumas medidas e, ou índices que retratam os

solos, dentre as quais: textura, estrutura, porosidade, permeabilidade e matéria orgânica presente.

O nível de matéria orgânica presente no solo é de suma importância no controle da erosão. Nos solos argilosos, a matéria orgânica altera a estrutura, melhorando as condições de retenção de água, enquanto nos solos arenosos, a aglutinação das partículas ao solo diminui o tamanho dos poros e, em contrapartida aumenta a capacidade de retenção de água (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

A textura do solo se refere apenas às proporções das frações argila, silte e areia presentes, embora os solos sejam constituídos por outras partículas inorgânicas de diversos tamanhos. Esta distribuição granulométrica do solo depende do material de origem e do grau de intemperização do mesmo (EMBRAPA, 2003).

A estrutura do solo diz respeito à forma de agrupamento das suas partículas elementares e determina as condições para o desenvolvimento das raízes das plantas, a permeabilidade da água e a resistência aos processos erosivos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

A porosidade é uma medida que retrata a proporção do solo que é ocupada por fluídos (água e ar) em relação à proporção ocupada pela massa do solo. A formação dos poros, espaços que contém os fluídos, varia em função da textura do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

A permeabilidade diz respeito à capacidade do solo de deixar passar água e ar através de seu perfil e está diretamente relacionada com o volume e tamanho das partículas e com a distribuição dos poros (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985).

Desta forma, reconhecer e estratificar os diferentes tipos de solos de uma bacia de drenagem é uma importante medida para a avaliação das suas propriedades relacionadas à susceptibilidade à erosão, além de permitir uma análise integrada a outros fatores como agentes contaminantes presentes no solo e, em última instância, na água.

2.5.3 Uso e ocupação da terra

O uso da terra de forma inadequada pode provocar a deterioração de todo o meio ambiente em determinado entorno, afetando inclusive a quantidade e a qualidade da água, como resultado da intensificação de uma série de processos que acarretam em: erosão, assoreamento, redução da infiltração da água contaminação do solo.

Como exemplo, Silva e Rodrigues (2004) apresentam uma relação dos diferentes usos e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do Córrego do Salto (Uberlândia, MG), apontando tal variável como determinante para os fatores que interferem na qualidade da água.

2.5.4 Fluxo acumulado

Fluxo acumulado é uma medida que retrata o fluxo superficial de água que chega a cada ponto da superfície do terreno; em outras palavras, é a área de contribuição de água a montante do ponto analisado (no mapa de fluxo acumulado digital, o valor da célula indica o número de células que contribuem com fluxo de água para a célula em questão) (FERRAZ *et al.*, 2007; FONSECA NETO *et al.*, 2007).

Para a obtenção do fluxo acumulado é necessário conhecer a geometria e a declividade do terreno (representados pelo modelo digital de elevação – MDE, Figura 5) e, além disso, a direção do fluxo, ou seja, direção de escoamento da água no terreno (Figura 5). A partir dessas informações, calcula-se o fluxo acumulado através do somatório das áreas (ou células) na direção do escoamento (MENDES e CIRILO, 2001).

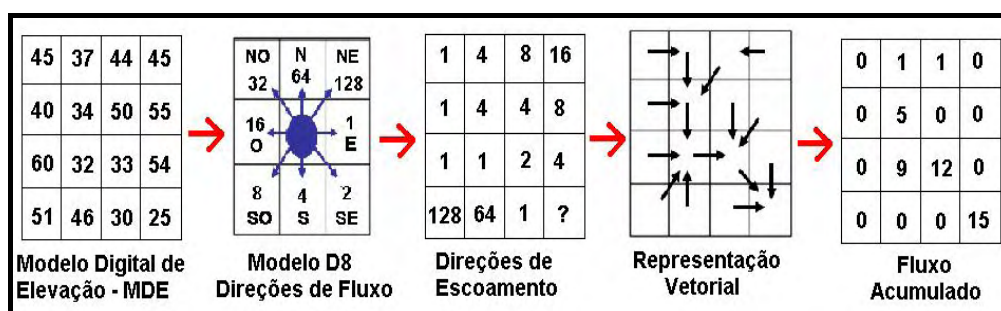


Figura 5. Passos e informações necessárias para geração de um mapa de Fluxo Acumulado.

Como pode ser observado na Figura 5, o valor do fluxo acumulado aumenta em cada célula da imagem no caminho do escoamento preferencial das águas (FONSECA NETO *et al.*, 2007). É fundamental ressaltar que o fluxo acumulado é uma importante camada de informação na geração do mapa de fragilidade para a qualidade da água superficial, porque juntamente com a água que esco sobre o terreno são carregados, em suspensão ou em solução, agrotóxicos, matéria orgânica, poluentes inorgânicos e microrganismos.

Além disso, Silva *et al.* (2003) comentam sobre a influência do fluxo acumulado nos processos erosivos. Segundo esses autores, conforme aumenta o caminho percorrido pela água no terreno, crescem também, progressivamente, o volume e velocidade da água, sendo que essa energia pode ser traduzida em aumento da erosão.

2.5.5 Distância das fontes de poluição

A distância do curso d'água às fontes de poluição pode ser um fator que pode afetar diretamente a qualidade da água, pois, em tese, quanto mais próximo do foco, maior será a probabilidade do contaminante/polvente vir a ser introduzido nos cursos hídricos.

2.6. Análise multicritério

Uma vasta gama de problemas complexos, caracterizados por apresentarem dois ou mais critérios geralmente conflitantes em relação à decisão, tem ocorrido com maior frequência na vida prática (HELMANN e MARÇAL, 2007). Segundo Gomes *et al.* (2009), tomar decisões em problemas complexos constitui tarefa difícil, uma vez que se deve atender múltiplos objetivos e critérios e, além disso, nem sempre as conseqüências dessas decisões podem ser previstas. Para atender a essa demanda tem sido utilizada a análise multicritério, que é um instrumento de apoio ao processo de tomada de decisão e uma opção para que critérios diversos e, por vezes, conflitantes sejam integrados (VILAS BOAS, 2004).

A análise multicritério teve início entre as décadas de 1970 e 1980, com finalidade de substituir os modelos de pesquisa operacional ortodoxos, provenientes

da década de 1950 e cujo objetivo era inicialmente a solução de problemas militares de logística durante a 2ª Guerra Mundial, na qual se aspirava a solução de complexos problemas de gerência (MARINS e COZENDEY, 2005).

A análise multicritério pode ser definida como um conjunto de técnicas aplicadas para auxiliar ou apoiar o processo de tomada de decisões, dada uma multiplicidade de critérios, estabelecendo uma relação de preferências entre as alternativas pré-avaliadas. Este método lida com problemas de otimização de processos decisórios (ALMEIDA e COSTA, 2005).

Além disso, é importante ressaltar que esta é uma técnica quantitativa para tomada de decisão, que gera valores subjetivos (as conclusões sobre os valores gerados dependem dos conhecimentos e critérios adotados pelo analista) ao processo decisório, no qual interagem os vários fatores envolvidos, possuindo então capacidade de unir todas as características importantes, inclusive as não quantitativas, dando transparência e sistematizando o processo de tomada de decisões (JANNUZZI, 2005).

De acordo com Silva *et al.* (1996), uma análise multicritério possui os seguintes atores/elementos básicos:

- **Gestores:** pessoas às quais foi delegado o papel de decidir, podendo, portanto, intervir na construção e na utilização do modelo de análise; os gestores lidam com um conjunto de relações existente entre os diferentes fatores, cujo caráter é dinâmico, uma vez que poderão sofrer modificações no decorrer do processo decisório com o surgimento de mais informações e/ou interferência proveniente dos especialistas;
- **Especialistas:** especialistas das diferentes áreas, cuja função é tornar claro o método de avaliação e transações relacionadas à tomada de decisões, gerando desse modo um modelo que pondere as informações;
- **Analistas:** auxiliam os especialistas e os gestores na estruturação dos problemas e na identificação dos critérios que influenciam na evolução, solução e configuração do problema;

- **Critérios:** são atributos quantificados ou ponderados que contribuem para a tomada de decisão. Podem ser de dois tipos: (i) fatores, variáveis que ponderam a aptidão de dada alternativa em relação ao objetivo em questão, ou (ii) restrições, variáveis que restringem as alternativas na análise, excluindo-as das possíveis soluções. Ex: limites físicos.

A fim de se estruturar e organizar variáveis espaciais, para tomada de decisões complexas, tem sido muito empregado o SIG, que representam e manipulam grande volume de dados e os armazena em bancos de dados, representando o mundo real, e possibilitando dessa maneira análises espaciais (relativa à localização) dos problemas (QUEEN e BLINN, 1993), de forma eficiente.

Além disso, com a integração da análise multicritério e do SIG, muitos dos problemas complexos, como os de planejamento e gerenciamento da Terra, o qual inclui a geração de mapas de fragilidade, podem ser executados de forma mais rápida e eficiente (ZAMBON *et al.*, 2005).

2.6.1 Etapas da análise multicritério

Segundo Soares (2003), de maneira geral, uma análise multicritério é executada em etapas que podem ser resumidas do seguinte modo:

1. **Definição do problema:** de modo simplificado, definir o problema é chegar a uma situação que necessita de uma decisão.
2. **Estabelecimento de critérios:** definição de critérios que permitam ponderar os efeitos que a decisão pode acarretar ao meio ambiente. Essa etapa envolve os objetivos, os recursos financeiros disponíveis para gerar um banco de dados coerentes ao objetivo, conhecimentos específicos e tempo disponíveis.
3. **Determinação de alternativas para o problema:** tanto os gestores quanto os especialistas envolvidos devem gerar um montante de alternativas (possíveis soluções ou caminhos a seguir) para que se possa atender ao problema encontrado.
4. **Avaliação dos critérios gerados:** nessa etapa busca-se relacionar os critérios gerados na etapa anterior e as alternativas propostas (analisando os prós e

contras, para chegar a resultados satisfatórios), através de matrizes de avaliação ou tabelas que mostram o desempenho dos critérios quando relacionados às alternativas sugeridas ao processo decisório.

5. **Ponderação/discriminação dos critérios:** os pesos são uma forma de exprimir quantitativamente o quão importantes são cada um dos critérios se comparados aos demais. Tal ponderação pode ser executada por diferentes métodos, de acordo com a finalidade e disposição de dados, tais como: distribuição de pesos, hierarquização de critérios, notação, regressão múltipla, taxa de substituição.
6. **Associação dos critérios e avaliação das alternativas:** basicamente, é executada uma associação entre o resultado das avaliações dos critérios para cada uma das alternativas. Em seguida, as alternativas são comparadas umas às outras através de um julgamento relativo de seus valores.

2.6.2 Homogeneização dos critérios

Antes de se atribuir pesos aos critérios é necessário fazer uma homogeneização dos seus valores, para que estes possam ter tratamento adequado pelo SIG. Essa homogeneização consiste em um processo de re-escalamento dos valores dos critérios para um intervalo comum a todos eles.

Se o critério em questão for uma restrição, este deve ter o formato booleano simples, ou seja, a imagem pode ter duas classes diferentes (aptas e não-aptas à solução desejada), atribuindo-se valor um (1) quando há aptidão da área para as possíveis alternativas ou, caso contrário, zero (0). Dessa maneira, aplicando álgebra entre imagens torna-se mais fácil inserir essas restrições a uma solução final coesa.

Se o critério em questão for um fator, a lógica *fuzzy* pode ser aplicada, como um método de padronização no qual os fatores são homogeneizados através de uma escala contínua de aptidão, variando de zero (no caso indica menor fragilidade) até um (no caso indica maior fragilidade). Assim, fuzzy pode ser definido como “classes para as quais a transição entre membros é gradual” (CALIJURI *et al.*, 2002). Essa lógica, através de funções sigmoidal, J-shaped e linear (ambas controladas por quatro

pontos ordenados do menor ao maior na escala de homogeneização), avalia o grau de aptidão ou de não aptidão dos pixels para o objetivo proposto (Figura 6).

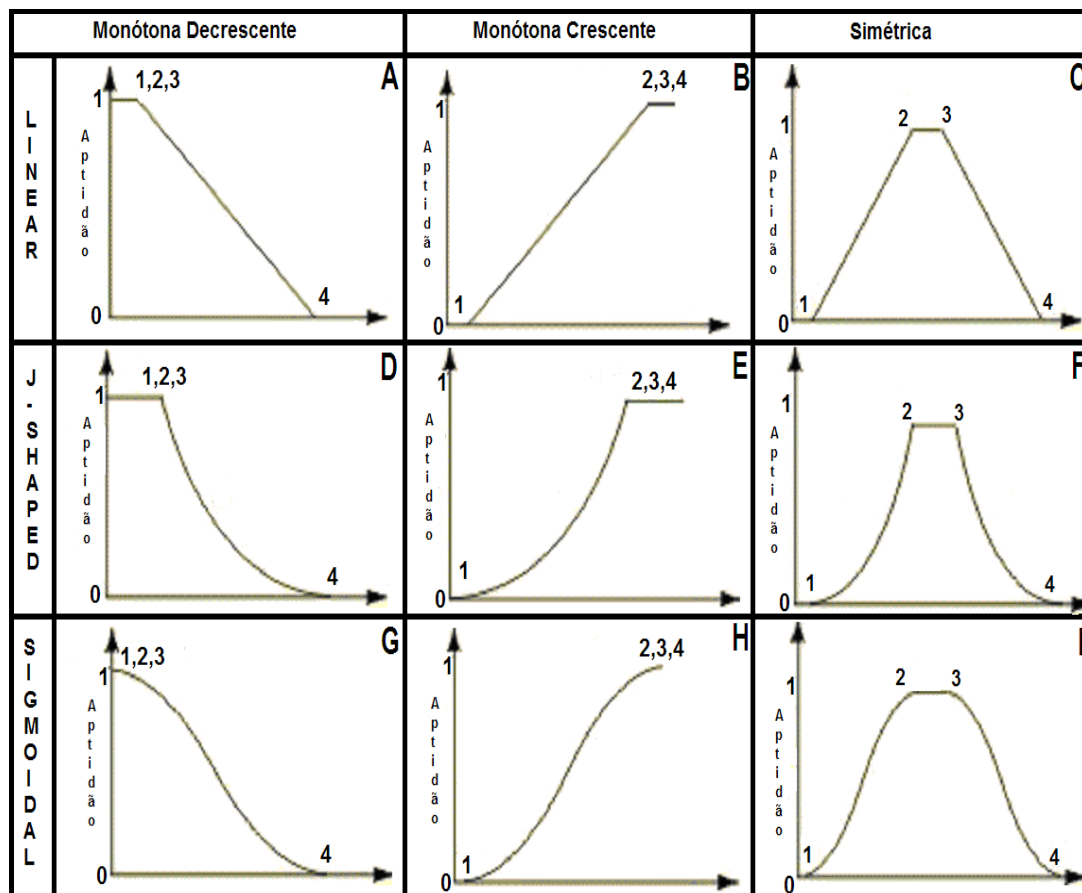


Figura 6. Combinação entre as três formas de função (monótona crescente, decrescente e simétrica) e os três tipos de função (sigmoide, J-shaped e linear).

Dentre esses quatro pontos utilizados para definir as funções aplicadas pelo fuzzy, em relação à forma simétrica (gráficos C, F e I da Figura 6), o primeiro mostra onde a função cresce a partir de zero (valor mínimo); o segundo ponto mostra onde a função atinge valor máximo; o terceiro ponto localiza onde a função começa a decrescer, enquanto o quarto ponto mostra onde a função retorna ao mínimo (CALIJURI *et al.*, 2002).

Se relacionado à forma monótona decrescente (gráficos A, D e G da Figura 6), os três primeiros pontos localizam onde a função começa a decrescer, enquanto o quarto ponto localiza onde a função atinge o mínimo. Já para a forma monótona crescente (gráficos B, E e H da Figura 6), o primeiro ponto localiza onde a função cresce a partir de zero, enquanto os demais localizam onde a função atinge o valor máximo.

Como resultado desse método são obtidos valores escalonados entre zero e um. É importante ressaltar que a baixa aptidão de um fator pode ser compensada pela alta aptidão de outro fator naquele mesmo local e, dessa maneira, a compensação de cada pixel será determinada pelo conjunto de fatores, definindo a aptidão global dele ao problema.

2.6.3 Ponderação dos critérios

Depois de realizada essa homogeneização dos valores de todos os critérios, é que discrimina a importância de cada um dos fatores, através da atribuição de pesos (pesos maiores implicam em maior relevância no processo). De acordo com Ramos (2000), não existe um único método para a atribuição dos pesos, mas vários procedimentos são citados na literatura.

A grande dificuldade encontrada pelos especialistas é atribuir um valor numérico aos critérios de forma direta, porém é relativamente mais simples fazer comparações através de avaliação semântica, ou seja, identificar se o critério é mais ou menos importante no processo dentre os demais critérios da análise. Esse é o raciocínio adotado para maior parte dos métodos de ponderação (UFSC, 2008).

Esses métodos podem ser baseados no ordenamento dos critérios (USP, 2008), em escala de pontos, também conhecido como escala de diferencial semântica (OSGOOD *et al.*, 1957), na distribuição de pontos aleatoriamente, ou na comparação de critérios par a par, como por exemplo, o Método de Análise Hierárquica – MAH (SAATY, 1977) e o MacBeth (COSTA e VANSNICK, 1997).

2.6.3.1 Método baseado no ordenamento dos critérios

Consiste em um método muito simples, que necessita que seja estabelecido o ordenamento simples dos critérios levando em consideração a ordem de importância atribuída pelo gestor (USP, 2008a). É atribuída a ordem ‘um’ ao critério mais importante da análise, ao segundo mais importante a ordem ‘dois’, e assim de forma sucessiva até o último critério, ao qual é atribuída a ordem ‘n’ (menos importante). A atribuição do peso por esse método pode ser descrita pela Equação 6:

$$w_j = \frac{T - p_j + 1}{\sum_{k=1}^k (T - p_k + 1)} \quad (6)$$

Onde:

w_j : peso normalizado do critério j ;

p_j : ordem ou posição no ranking do critério j ;

T : número total de critérios.

2.6.3.2 Método da escala diferencial semântica

O Método da escala diferencial semântica é outra maneira simples de ponderar os critérios, excepcionalmente em casos para os quais a avaliação direta é viável. O método faz a diferenciação entre os critérios considerando sete diferentes níveis para expressar adequadamente a sua importância global relativa (OSGOOD *et al.*, 1957).

Inicialmente, relacionam-se cada um dos critérios a um valor na escala de um a sete (Figura 7), descrita por Osgood *et al.* (1957), através da qual quanto maior o valor, ou seja, quanto mais o valor tende a sete, mais importante é o critério analisado.

Insignificante	1	2	3	4	5	6	7	Importante
----------------	---	---	---	---	---	---	---	------------

Figura 7. Escala de relacionamento de critérios que varia de um a sete, definida por Osgood *et al.* (1957)
(Fonte: USP, 2008).

Em seguida, após a avaliação de todos os critérios é realizada a normalização desses valores atribuídos, de forma a tornar a somatória deles igual a um, o que resulta no conjunto de pesos desejado. A normalização se faz necessária porque os valores dos critérios não são comparáveis entre si, o que não torna possível sua imediata agregação.

Com esse intuito é aplicada a Equação (7), que é a forma mais eficiente de enquadrar o somatório dos pesos dentro do exigido:

$$x_i = \frac{(R_i)}{(\sum_1^n R_j)} \quad (7)$$

Onde:

R_i é o grau de importância do critério a ser normalizado;

R_j é o grau de importância do j -ésimo critério;

N é o número total de critérios.

2.6.3.3 Métodos de comparação par a par - MAH

Dentre os métodos de ponderação, o mais adotado (COSTA, 2001) é o método da análise hierárquica MAH (SAATY, 1977), que faz comparações par a par entre os critérios que interferem em um problema, estabelecendo uma hierarquia entre eles.

Segundo Zambon (2005), este procedimento utiliza uma matriz quadrada $m \times m$, na qual suas componentes (linhas e colunas) correspondem aos m critérios utilizados para solucionar o problema. Os valores contidos nessa matriz representam basicamente a importância do critério da linha i se comparado ao critério da coluna j , devido a este fato se obtêm diagonal unitária. Em se tratando da reciprocidade dos critérios, a matriz é preenchida nos softwares apenas como triangular inferior, uma vez que a metade superior é derivada desta.

A principal questão a ser considerada, segundo Fatureto e Santos (1997), refere-se ao peso com o qual os fatores da parte inferior da hierarquia podem influenciar o objetivo da análise, que ditará se esses fatores devem ou não ser enfatizados no processo. Dessa maneira, a comparação entre os critérios feita par a par utiliza uma escala de normalização (Figura 8).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente	Bastante	Muito	Pouco	Igual	Pouco	Muito	Bastante	Extremamente
MENOS IMPORTANTE					MAIS IMPORTANTE			

Figura 8. Escala normalizada de valores a serem aplicados na matriz do MAH de acordo com a importância dos critérios se comparado aos demais.

Essa ponderação revela o quão importante são cada um dos fatores envolvidos e, além disso, determina a regra de compensação entre eles no processo decisório.

O módulo WEIGHT implementado no software IDRISI ANDES utiliza a MAH para ponderar os critérios de forma que os pesos possuam somatório igual a um (CALIJURI *et al.*, 2002). Além disso, esse módulo calcula a razão de consistência, que mostra ao usuário qualquer inconsistência durante a ponderação, permitindo que ele faça ajustes no modelo até encontrar uma ponderação consistente (CALIJURI *et al.*, 2002).

2.6.3.4 Métodos de comparação par a par - MacBeth

O método Macbeth, que executa a comparação dos critérios par a par, utiliza a transformação das avaliações semânticas dos critérios em escalas de valor numérico, buscando superar as limitações existentes em outros métodos devido a inconsistências do julgamento (UFSC, 2008).

De acordo com Costa e Vansnick (1997), são necessários os seguintes procedimentos para sua utilização:

- **Definição do impacto de cada critério sobre as alternativas propostas e sua ordenação:** para ordenação é utilizada a matriz de ordenamento, na qual o especialista compara os níveis de impacto dos critérios dois a dois, indicando qual deles possui maior risco. Se o critério da linha i possuir maior risco que o critério da coluna j atribui-se o valor 1 ao campo ij da matriz, caso contrário, atribui-se o valor zero. Ao se efetuar o somatório de cada linha da matriz de ordenamento é obtido um *ranking* do nível de impacto dos critérios.

- **Construção de uma escala de valor local:** depois de ordenados os níveis de impacto na matriz de ordenamento de forma decrescente, o especialista avalia o grau da diferença de impacto entre cada par comparado, empregando uma das seis categorias semânticas (Tabela 2) utilizadas pelo MacBeth. Com esses julgamentos dos níveis de impacto dos diferentes critérios, os programas lineares do MacBeth definem a escala de impacto para cada critério.

Tabela 2. Escala Semântica de Julgamento MacBeth.

Categoria	Definição
C0	Indiferente
C1	Diferença muito Pequena
C2	Diferença Pequena
C3	Diferença Moderada
C4	Diferença Forte
C5	Diferença muito Forte
C6	Diferença Extrema

- **Cálculo dos pesos dos critérios:** inicialmente os critérios são ordenados em relação à intensidade de impacto, através da comparação entre a passagem do nível mais baixo de um critério para seu maior nível de impacto, mantendo todos os outros critérios no nível mais baixo de impacto, relacionado à mesma mudança para o outro critério (Figura 9).
- Com base na matriz de julgamento dos critérios, Macbeth constrói uma escala de valor numérica para os critérios. Os coeficientes de ponderação são obtidos após normalização da escala.

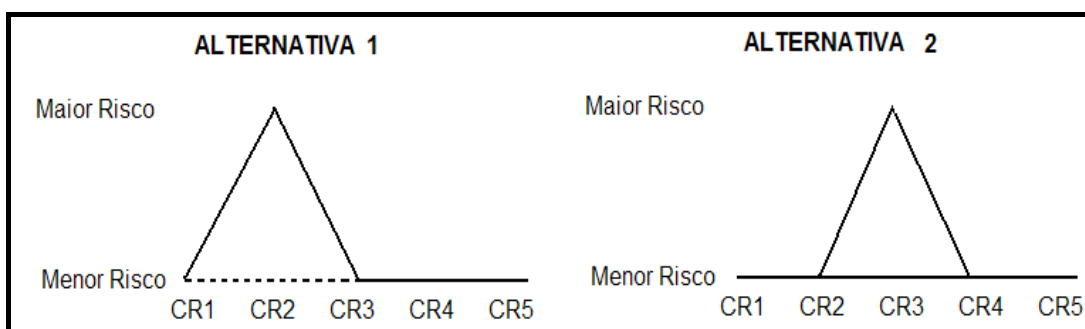


Figura 9. Determinação do nível de impacto relativo de cada critério (CR).

- **Cálculo do valor global das alternativas:** é executado pela forma canônica do modelo aditivo para a agregação dos critérios, gerando valores com

significância na comparação entre as intensidades de impacto dos critérios nas alternativas avaliadas.

Além disso, é importante ressaltar que o MacBeth é um método iterativo para a construção de uma escala numérica, relacionada a um conjunto de possíveis alternativas, baseado na resolução de modelos de programação linear (MC1, MC2, MC3 e MC4), como mostra a Figura 10 (COSTA e VANSNICK, 1997).

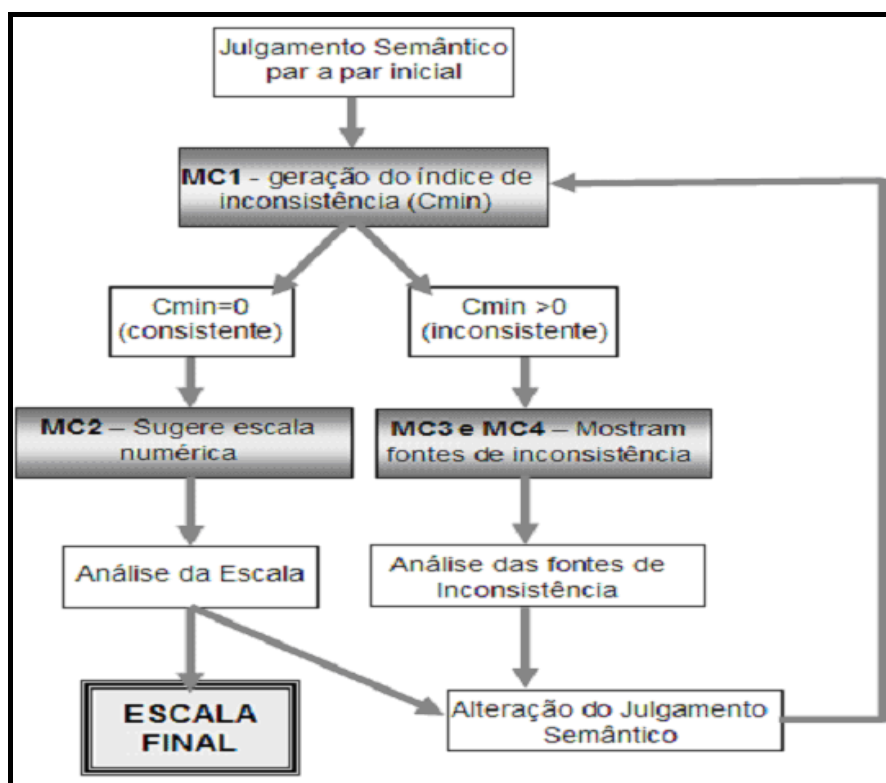


Figura 10. Fluxograma do processo iterativo Macbeth
(Fonte: Adaptado de Costa e Vansnick, 1997).

Como pode ser observado na Figura 10, o processo de ponderação se inicia com a atribuição de valores semânticos para os critérios, em seguida o programa MC1 avalia a consistência numérica dos julgamentos através da teoria da semi-ordem, gerando um indicador de inconsistência C_{min} , além de determinar a existência de limiares constantes sk entre os diferentes julgamentos (UFSC, 2008).

Se C_{min} for igual a zero, o conjunto de julgamentos é considerado consistente pelo programa MC1, que admite então infinitas soluções para a atribuição dos pesos, a definição do melhor conjunto de pesos é feita pelo programa MC2, que minimiza os desvios absolutos das classes, a fim de centrá-los dentro de cada intervalo sk .

Após rodar o programa MC2, ainda é necessário fazer uma análise do conjunto de pesos obtidos a fim de validá-los.

Caso contrário, ou seja, se C_{min} for maior que zero, há fontes de inconsistência nos julgamentos e os programas MC3 e MC4, respectivamente, revelam todas as possíveis fontes de inconsistência e geram um número restrito de sugestões de modificação para as mesmas.

Finalmente, após a avaliação dos pesos gerados, inicia-se o processo de validação dos julgamentos, que pode ser feito através de uma análise de sensibilidade, a qual permite analisar a estabilidade dos resultados em relação às mudanças nos julgamentos e ver o quanto são confiáveis.

2.6.4 Combinação dos critérios

Depois de passar os critérios pelo processo de homogeneização das escalas e de atribuir pesos aos critérios, vem o processo de combinação dos mesmos de acordo com regras de decisão para se chegar a uma ou mais conclusões ou respostas ao problema em questão.

São dois os métodos de combinação dos critérios mais utilizados e implementados no software IDRISI ANDES: Combinação Linear Ponderada (WLC – *Weighted Linear Combination*) e a Média Ponderada Ordenada (OWA – *Ordered Weighted Average*).

2.6.4.1 Combinação Linear Ponderada - WLC

O WLC (Combinação Linear Ponderada) é um dos procedimentos mais comuns para a agregação de dados, através do qual os fatores homogeneizados são multiplicados pelos seus respectivos pesos, em seguida são somados e o resultado é dividido pelo número de fatores. Essa técnica é muito conservadora, ou seja, fica situada entre o risco extremo e a compensação extrema (CALIJURI *et al.*, 2002).

Em outras palavras, pode-se dizer que o WLC (VOOGD, 1983, citado por: EASTMAN *et al.*, 1995) combina os fatores através de uma média ponderada, dada

pela Equação 8. Considerando que a soma dos pesos é igual a um, o resultado final aparece na mesma escala utilizada para homogeneizar os critérios.

$$S = \sum_i w_i x_i \quad (8)$$

Onde:

S : valor final do score;

w_i : peso do fator i ;

x_i : valor normalizado para o mesmo fator

As restrições, que possuem formato booleano, não recebem pesos, elas agem como máscaras ou multiplicadores, ou seja, áreas de valor zero são retiradas da análise e áreas de valor unitário não afetam a combinação entre os fatores. Desta forma, se obtém como resultado uma imagem que representa a medida de aptidão da área, variando entre um e zero ou outra escala a critério do usuário em localizações sem restrição.

O procedimento WLC é um caso particular do procedimento OWA, que é mais geral, no qual há compensação média e risco médio entre os critérios (ZAMBON *et al.* 2005).

2.6.4.2 Média Ponderada Ordenada - OWA

A Média Ponderada Ordenada - OWA pondera os fatores de acordo com sua importância relativa e mantém as restrições como máscaras booleanas que multiplicam o resultado da integração dos fatores (ZAMBON *et al.* 2005).

Segundo Calijuri *et al.* (2002), esse método de agregação permite ao usuário controlar a relação risco e compensação durante a análise, de forma a conhecer o nível do risco assumido na decisão e o grau em que a ponderação dos fatores terá influência sobre o mapa de aptidão. Assim o OWA permite várias soluções possíveis, fazendo esse controle do risco (Equação 9) e compensação via um grupo de pesos ordenados em diferentes posições, que modificam inicialmente o grau que os fatores afetarão o processo de agregação e, desse modo, o nível total compensação.

$$\boxed{Risco = 1 - \sqrt{\frac{T \sum_i (O_i - \frac{1}{n})^2}{n-1}}} \quad (9)$$

Onde:

T é o número total de fatores;

i é a ordem do fator;

O_i é o peso ordenado para o fator de ordem i .

De acordo com Tesfamarian e Sadiq (2008), o nível de risco é uma função da posição dos pesos ordenados no ranking e da magnitude de seus valores, sendo os valores maiores locados nas primeiras posições representando menor risco, e os valores menores nas últimas posições representando maior risco. Além disso, ao variar os pesos ordenados, qualquer combinação é possível desde que seu somatório seja igual a um.

O OWA possibilita a utilização de diferentes opções de agregação dos critérios. O deslocamento relativo dos pesos ordenados no sentido do mínimo para o máximo controla o nível de risco (*ANDness*). Em contrapartida, a homogeneização da distribuição dos pesos ordenados nas diferentes posições controla o nível de compensação global (Equação 10) ou Trade-off (SOARES *et al.*, 2005).

$$\boxed{Compensação = \frac{1}{n-1} * \sum((T-i) * O_i)} \quad (10)$$

Onde:

n é o número total de fatores;

i é a ordem do fator;

O_i é o peso ordenado para o fator de ordem i .

O resultado do OWA pode ser visto como um espectro de decisão estratégica aproximadamente triangular (Figura 11), definido de um lado pela atitude de risco e, por outro pela compensação (EASTMAN *et.al.*, 1995).

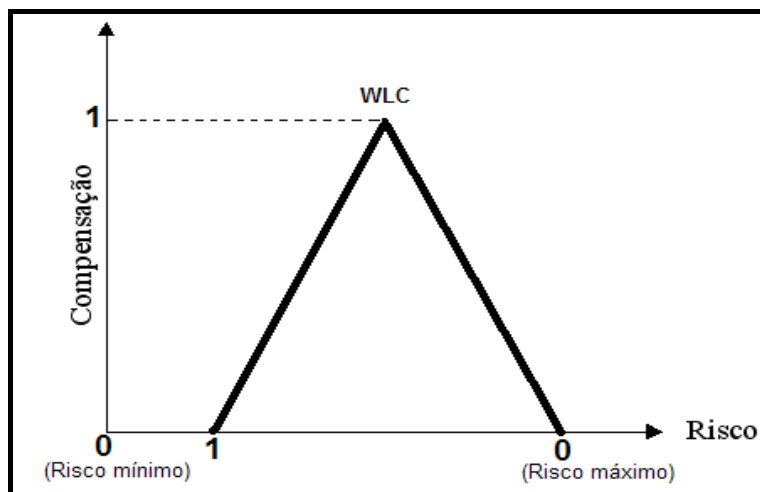


Figura 11.Gráfico de decisão OWA
(Fonte: Adaptado de Eastman,1995).

2.7. A técnica Delphi de consulta a especialistas

De acordo com Piola *et al.* (2002), a metodologia Delphi pode ser vista como uma forma de estruturar um processo de comunicação, de forma a possibilitar que um conjunto de especialistas gere uma opinião coletiva qualificada sobre problemas complexos. Segundo Grisi e Britto (2003), o uso atual dessa técnica tem como objetivo apoiar o processo de tomada de decisão e a determinação de políticas para inúmeros fins.

Inicialmente, a fim de se aplicar o método, deve-se escolher um grupo multidisciplinar de especialistas que possuam grande conhecimento sobre o fenômeno tratado e, preferencialmente, esses especialistas devem conhecer a região onde esse fenômeno está inserido. Em seguida, é apresentado a esses especialistas um conjunto de variáveis (fatores ou camadas de informação), solicitando hierarquização ou a atribuição de notas de importância a essas variáveis, pensando sempre no fenômeno em questão como fator norteador (MOURA, 2007).

Segundo Moura (2007), após o recebimento das opiniões do grupo gera-se a mediana e calculam-se os *quartis* dessas respostas, mostrando o predomínio estatístico destas. Sequencialmente, esses dados estatísticos são enviados aos

especialistas juntamente com a opinião inicial, sendo então solicitado que, se julgado pertinente, revejam suas posições diante da opinião do grupo. Deve ser executado um número de ‘rodadas’ suficiente para reduzir a divergência dos especialistas a um nível considerado satisfatório, ou seja, buscando forma o ‘consenso’ entre o grupo (GRISI e BRITTO, 2003).

De forma resumida, o processo é realizado baseado em três premissas essenciais: i) o anonimato da opinião dos especialistas, segundo Grisi e Britto (2003) a fim de evitar influências *a priori* e possíveis constrangimentos caso haja mudança de opinião; ii) o tratamento estatístico da distribuição das respostas obtidas; e iii) o retorno das respostas do grupo e do tratamento estatístico para os especialistas, a fim de permitir reavaliação de opiniões individuais nas rodadas seguintes (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000).

Essa técnica pressupõe que o consenso do grupo é mais adequado que a opinião individual de apenas um especialista. Diz-se estatisticamente que o processo evolui ao consenso através da relação entre o distanciamento dos 1º e 3º *quartis* e o valor da mediana das respostas, que deve sempre diminuir a cada rodada (GRISI e BRITTO, 2003). A Figura 12 ilustra o processo.

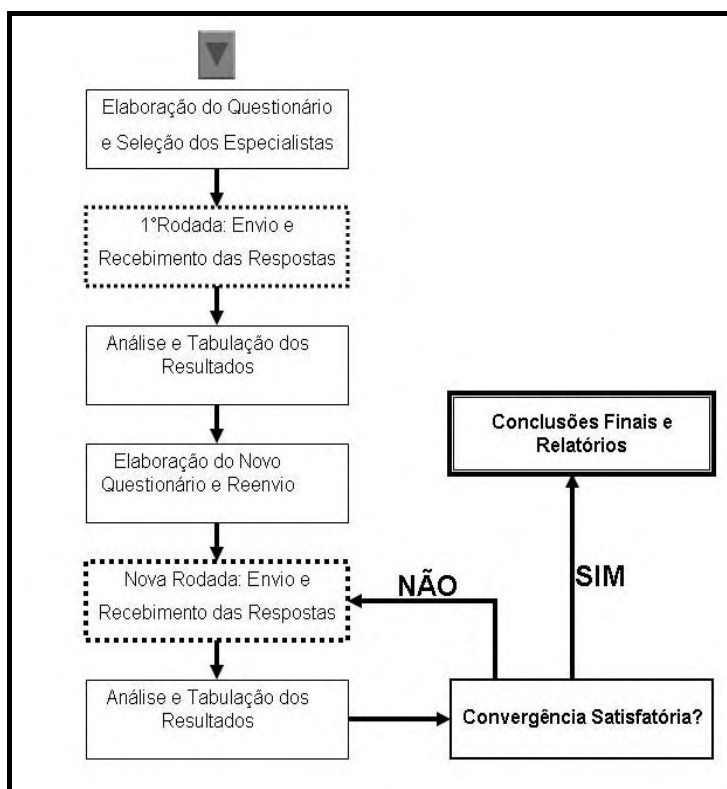


Figura 12. Representação das etapas necessárias para a aplicação do método Delphi. (Fonte: Adaptado de WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000)

O método Delphi apresenta inúmeras vantagens, tais como: (i) maior reflexão sobre o fenômeno tratado, o anonimato das respostas, a sinergia de pontos de vista e, portanto, maior credibilidade do estudo (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000; CARDOSO *et al.*, 2005). Porém, também são encontradas dificuldades na aplicação do método e, ou desvantagens sobre a reunião tradicional de especialistas, tais como: dificuldades na elaboração dos questionários, dificuldade na obtenção de respostas e possibilidades de forçar o consenso, por meio de viés na seleção dos especialistas (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000; GRISI e BRITTO, 2003; CARDOSO *et al.*, 2005).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da área de estudos

O estudo foi desenvolvido no município de Viçosa (inserido na Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais), localizado entre as coordenadas geográficas 42°52'58" W e 42° 50'56" W de longitude e 20°43'42" S e 20°50'12"S de latitude, altitude média de 648 m (ARRUDA, 1997), área de 299,397 km² e 74.607 habitantes (população estimada para 1/06/2006 segundo IBGE¹) basicamente concentrados na zona urbana (aproximadamente 90%).

A bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu (RSB), componente da bacia do Rio Doce, abrange uma área de, aproximadamente, 55 km², representando cerca 18 % da área do município (Figura 1). A área de estudo propriamente dita compreendeu a bacia hidrográfica à montante da área urbana do município e do ponto de captação de água para abastecimento para consumo humano (aqui denominada bacia de captação), em uma extensão de aproximadamente 2.000 ha (Figuras 13 e 14).

A cidade de Viçosa dispõe de dois sistemas principais de abastecimento de água, operados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgotos (SAAE) (uma autarquia municipal), interconectados e que abastecem a população residente na zona urbana do município: (i) sistema ETA I, suprido pelo RSB e (ii) sistema ETA II, suprido pelo Rio Turvo Sujo. No ponto de captação (reservatório de acumulação localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa- UFV) para abastecimento do sistema ETA I, o SAAE extrai e trata cerca de 100 L/s. A UFV possui seu próprio sistema de abastecimento de água, o qual atende cerca de 10.000 pessoas que trabalham e residem (estudantes) no campus universitário. Em ponto de captação adjacente ao do sistema ETA I do SAAE, a UFV extrai e trata cerca de 50 L/s (Figuras 13 e 15).

No campus da UFV, o Ribeirão São Bartolomeu recebe cinco barramentos consecutivos. As duas primeiras represas cumprem a função de reservatórios de

¹ <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2006/estimativa.shtm>

acumulação, sendo que, na segunda, como referido, encontram-se as estruturas de captação de água para abastecimento do campus universitário e de parte da cidade (Figura 15).

Em sua bacia de captação o RSB recebe o aporte hídrico de sete córregos, que definem os fundos de vale das sub-bacias de drenagem correspondentes, as quais serviram como unidade territorial básica no presente estudo. Essa sub-bacias recebem, informalmente, a mesma denominação do respectivo curso d'água principal: sub-bacia 1: Córrego São Lucas, sub-bacia 2: Córrego dos Machados, sub-bacia 3: Córrego Santa Catarina, sub-bacia 4: Córrego Paraíso, sub-bacia 5: Córrego Palmital, sub-bacia 6: Córrego Antuérpia, sub-bacia 7: Córrego do Engenho (Figura 14).

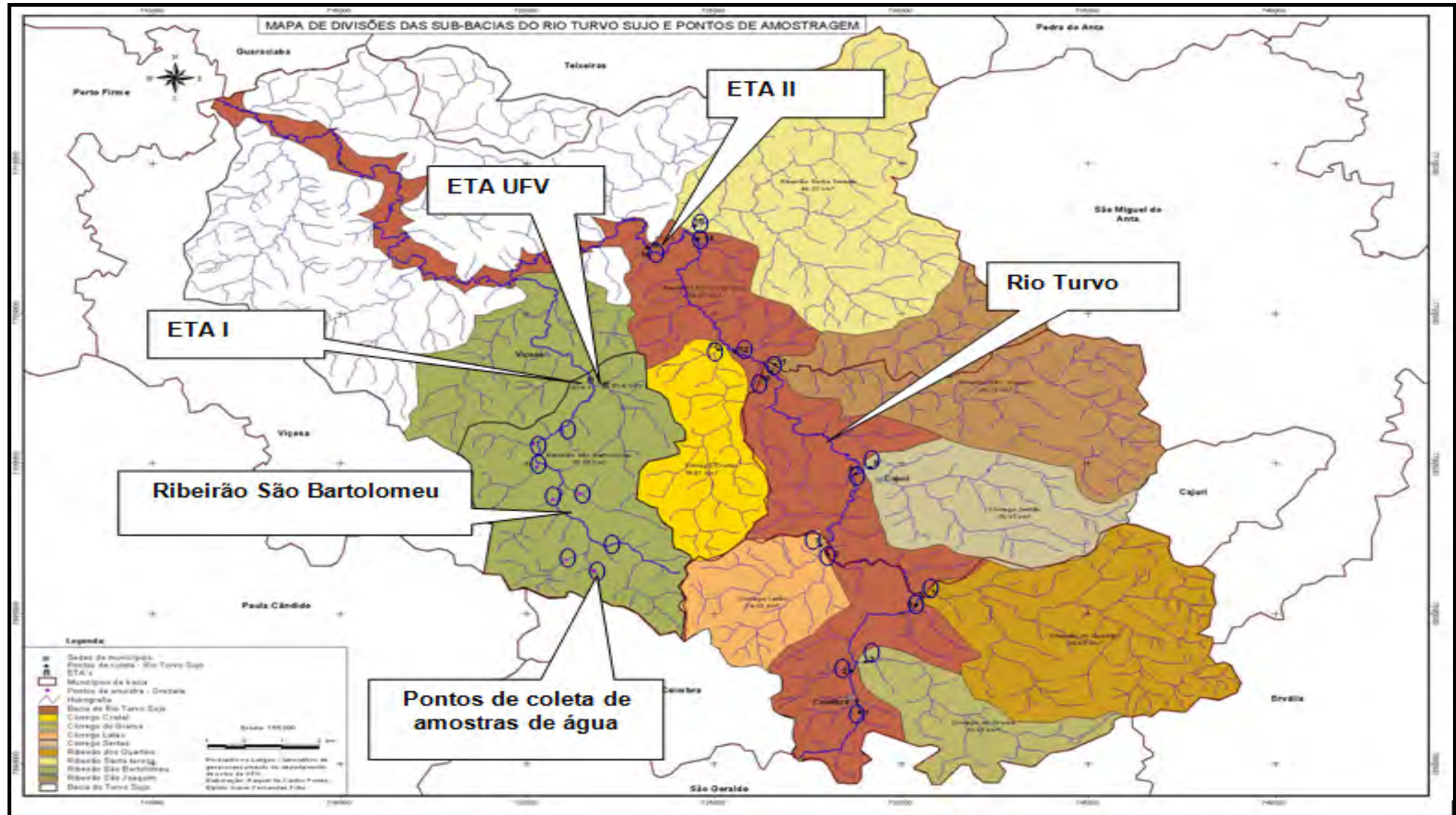


Figura 13. Hidrografia, localização das estações de tratamento de água e dos pontos de amostragem de água nas bacias do Ribeirão São Bartolomeu e do Rio Turvo Sujo. Fonte: Bastos (2009).

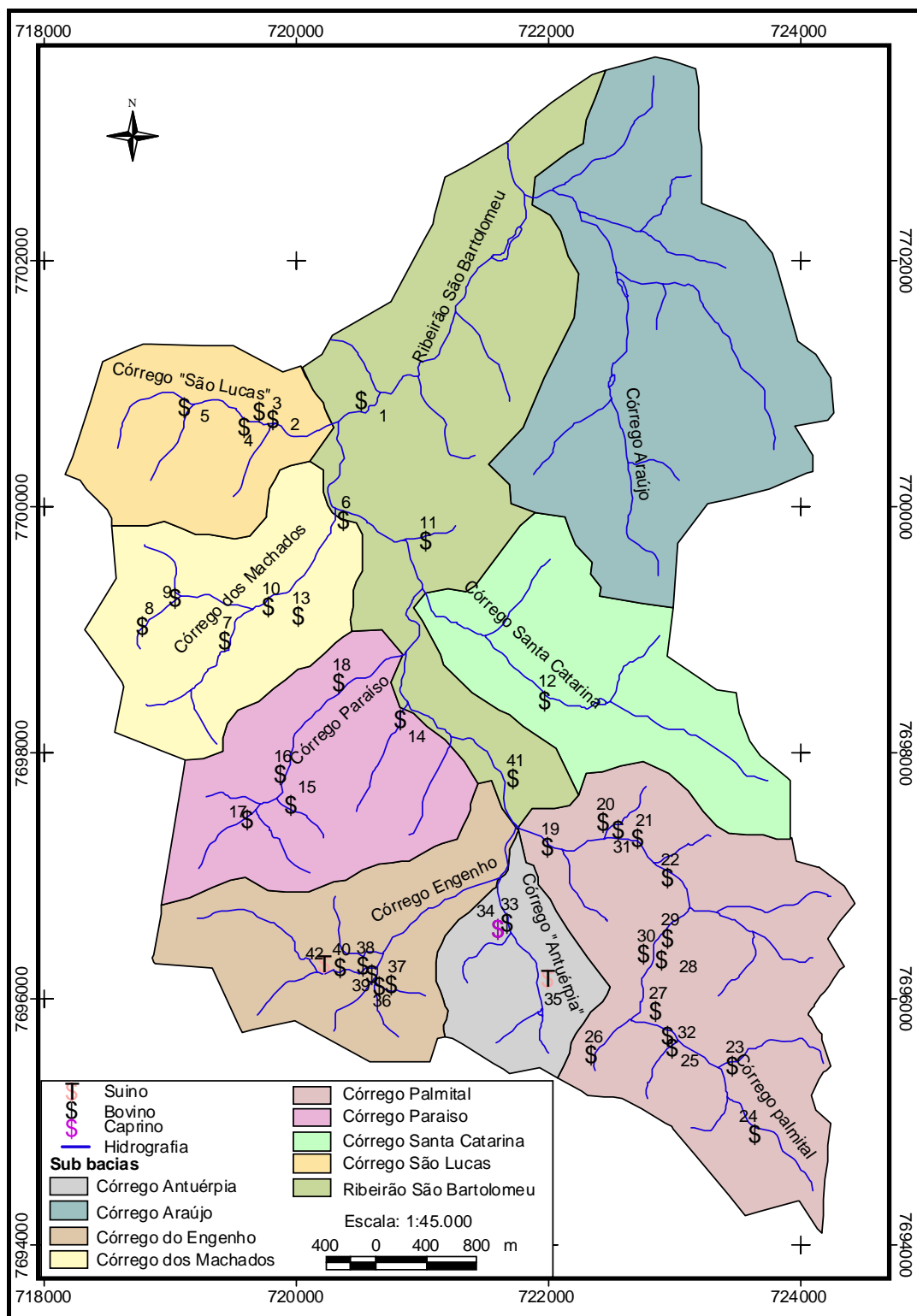


Figura 14. Delimitação das sub-bacias e localização das propriedades rurais, bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa–MG, 2004. Fonte: Dias (2007).



Figura 15. Ponto de captação para abastecimento de água da ETA I SAAE e ETA UFV, Viçosa-MG

A região possui topografia fortemente acidentada, composta de relevo ondulado e fortemente ondulado com encostas de perfil côncavo-convexo embutindo em vales de fundo chato, formados por terraço e leito maior (CORRÊA, 1984). Os topos aplainados ou abaulados funcionam como divisores de água para as sub-bacias de drenagem que compõem a bacia da São Bartolomeu (Figura 14).

De acordo com o sistema de classificação de Köppen, o clima da região é do tipo CWb sub-tropical de altitude mesotérmico e se caracteriza por verões chuvosos e brandos, com precipitação média anual de 1200 mm, sendo julho e agosto os meses mais secos e frios do ano (CASTRO, 1983).

A vegetação natural que cobre essa bacia é a Floresta Atlântica, porém a região tem vivido um intenso processo de substituição da vegetação natural por pastagens e lavouras; além disso, há exploração seletiva das madeiras nobres, fazendo com que a área da Floresta se tornasse fragmentada, empobrecida e praticamente inserida nos topos de morros e áreas de maior declive, exatamente em terrenos onde a atividade agropecuária praticada na região não se insere bem (SILVA, *et al.*, 2009).

O uso e ocupação da terra na bacia de captação do RSB é caracterizado por intensa atividade agropecuária desenvolvida por pequenos produtores rurais e, mais recentemente, expansão urbana, com a implantação paulatina de condomínios e loteamentos; existem ainda áreas florestais, mas nos locais com maior declividade há predominância de pastagens degradadas.

Informações levantadas em trabalho anterior na mesma área de estudo (DIAS, 2007) e confirmadas com boa aproximação no Projeto Plano de Segurança da Água (BASTOS, 2009), indicaram a existência de 42 propriedades com explorações animais. Desse total 92,7% se dedicavam a produção de bovinos e 7,3% à caprinocultura (49 animais) ou à suinocultura (870 animais) (ver Figura 15). Em linhas gerais, ambos trabalhos revelaram que a pior qualidade da água dos córregos (em termos de contaminação com protozoários) foi registrada nas sub-bacias com maior densidade de animais (Córrego Antuérpia e Córrego Engenho) e, ou com maior número de propriedades (Córrego Palmital). Em contrapartida, a sub-bacia Córrego Santa Catarina, com o menor número de propriedades, foi também a que revelou a melhor qualidade da água do respectivo córrego.

A ocupação urbana se dá de forma mais intensa nas regiões mais próximas à área urbana da cidade e ao campus universitário. Os trabalhos acima referidos revelaram ainda que uma estação de tratamento de esgotos, cujo efluente é lançado no Ribeirão São Bartolomeu, constitui também fonte destacada de contaminação da água com protozoários.

3.2. Etapas da Metodologia

Resumidamente, a metodologia consistiu em onze etapas (Figura 16): (1) Geração da base de dados; (2) Aplicação do método Delphi; (3) Recorte das imagens; (4) Ponderação dos critérios através de diferentes métodos; (5) Aplicação da Análise Multicritério; (6) Geração de mapas de fragilidade (perigos); (7) Coleta de amostras para a definição da qualidade da água na bacia; (8) Definição da forma de espacialização dos índices de qualidade; (9) Espacialização dos dados e geração dos mapas de índices; (10) Comparação dos mapas de fragilidade (perigos) com os mapas dos índices espacializados (Validação); (11) Análise e Conclusões.

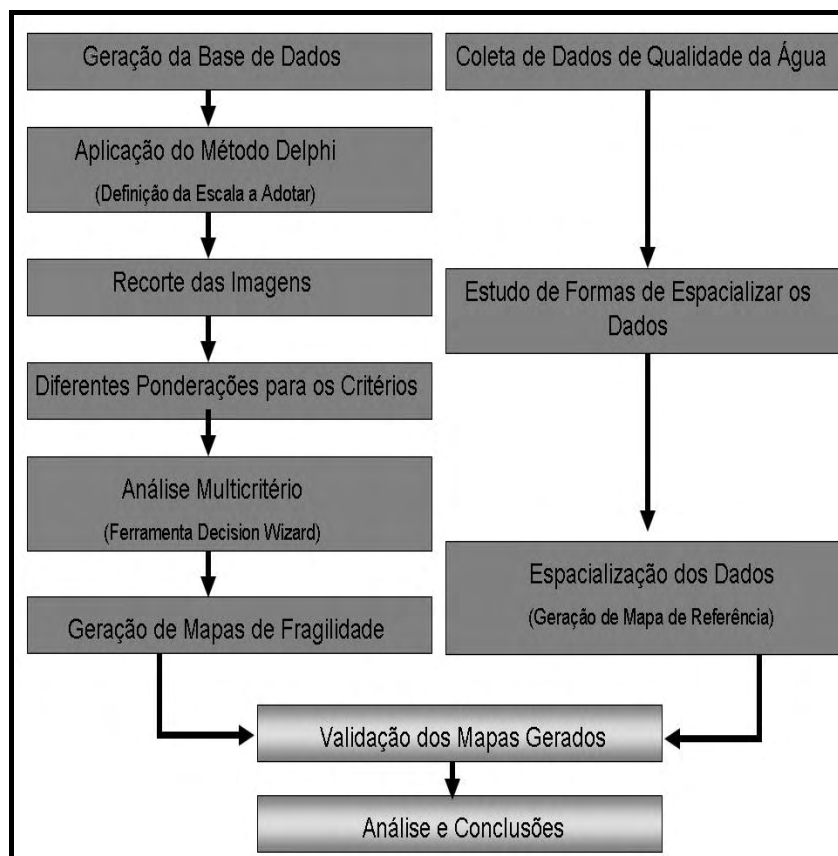


Figura 16. Ilustração esquemática das etapas de execução do estudo.

3.3. Geração da base de dados

Após a definição das informações necessárias (declividade, fluxo acumulado, tipos de solos, distância das fontes de poluição e uso e ocupação), primeiro passo, executado por uma equipe multidisciplinar e no âmbito do referido projeto ‘Plano de Segurança da Água’ foi confeccionar as diferentes camadas de informação a serem empregadas na análise multicritério.

3.2.1 Mapa de uso e ocupação

De posse de um mosaico de toda a área de estudos, composta por imagens IKONOS com resolução espacial ou geométrica e reamostrada para 5m x 5m já corrigida radiométrica e geometricamente (adquirida no âmbito do Projeto Plano de Segurança da Água), foram identificados e vetorizados polígonos contendo as diferentes classes de uso e ocupação da terra. Dentre as classes de interesse destacadas tem-se: (i) Uso, composto por olericulturas (hortaliças), café, culturas

anuais (milho e feijão), áreas urbanizadas, pastagem degradada, pastagem não degradada, (ii) elementos topográficos/naturais, composto por solo exposto, formações florestais (mata e capoeira) e hidrografia.

Porém, devido à existência de algumas nuvens na imagem e da dificuldade de se classificar certas culturas agrícolas usando apenas as imagens IKONOS, foram realizadas visitas ao campo a fim de identificar essas áreas, com a coleta de pontos GPS e sua descrição, finalizando deste modo a confecção do mapa de uso e ocupação.

3.2.2 Mapa de tipos de solos

O mapa de tipos de solos foi confeccionado dentro do escopo do 'Plano de Segurança da Água', e contou com uma série de amostras de solos coletadas em campo, que foram devidamente espacializadas, uma vez que o local de coleta foi rastreado com o apoio de GPS.

Além disso, o conhecimento prévio já existente sobre a bacia hidrográfica em análise foi empregado na confecção desse mapa, compreendendo a interpretação visual de altimetria e declividade, cuja chave de identificação foi fundamentada no modelo solo/paisagem proposto por Côrrea (1984).

Resumidamente, foram identificadas e espacializadas três principais classes de solos na região, são elas: Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo (PORTES, 2008).

3.2.3. Mapa de declividade

O mapa de Declividade foi gerado através das curvas de nível da região, de 5 em 5 metros, que foram adquiridas juntamente com o mosaico da bacia. Inicialmente, para gerar um modelo digital de elevação (MDE), as curvas foram interpoladas através de uma malha triangular que utiliza os vértices das curvas de nível como pontos a interpolar; para tanto, foi utilizado o comando *Interpolation/TIN* do software Idrisi Andes (Figura 17).

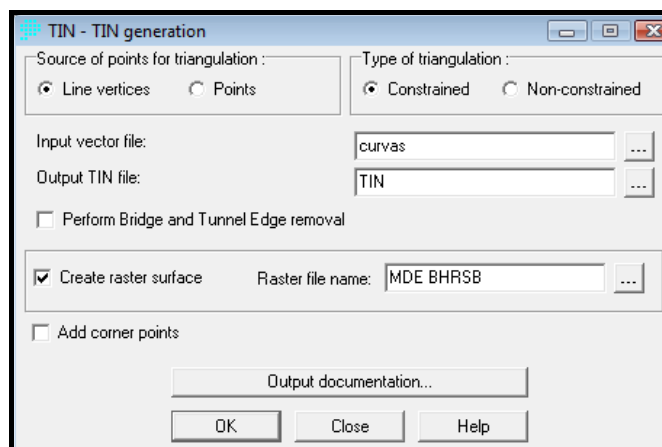


Figura 17. Comando de interpolação TIN, do software Idrisi Andes utilizado para gerar o Modelo Digital de Elevação da bacia do Ribeirão São Bartolomeu.

Sequencialmente, a fim de obter a declividade foi aplicado o comando *Slope* (Figura 18) do programa *Idrisi Andes*, que a partir das curvas de nível gera as declividades da área em percentual.

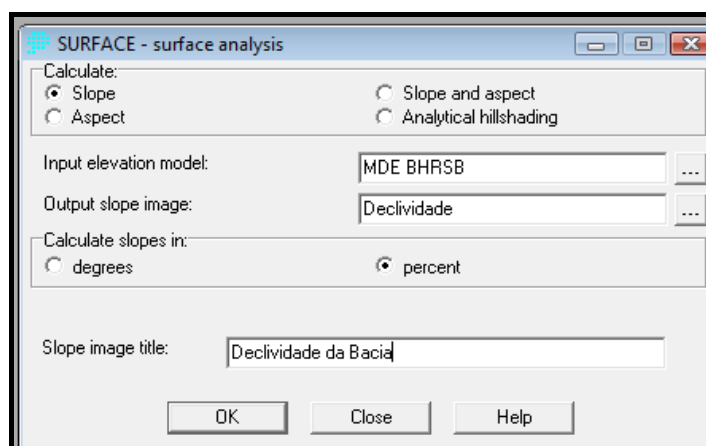


Figura 18. Comando Slope do programa Idrisi Andes utilizado para gerar mapa de declividade em percentual a partir do modelo digital de elevação de determinada região.

3.2.4 Mapa de fluxo acumulado

A fim de gerar o mapa contendo o fluxo acumulado da bacia foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE). Porém, esses modelos contêm depressões espúrias, que são células cercadas por outras com maiores valores de elevação (Figura 19), as quais geram descontinuidade da drenagem, interrompendo o

escoamento superficial além da segmentação da área de contribuição e, conseqüentemente, impedem a sua correta delimitação.

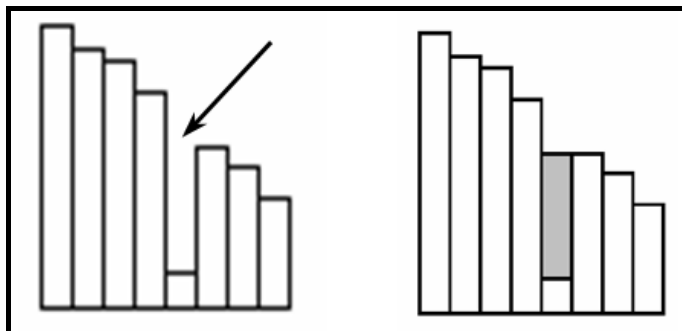


Figura 19. Representação de uma depressão espúria à esquerda e do mesmo relevo após sua eliminação à direita (POLETO *et al.*, 2008).

A fim de eliminar tais depressões, foi utilizada a extensão *Spatial Analyst*, na qual foi solicitada a ferramenta *Hidrology* e o comando *Fill*.

Sequencialmente, utilizando o MDE com as depressões espúrias preenchidas e o comando *Flow Direction*, utilizado para indicar a direção do fluxo da água em cada uma das células, foi possível empregar o comando *Flow Accumulation*, que fornece o fluxo acumulado de água em cada célula da imagem.

3.2.5. Mapa de distância das fontes de poluição

Inicialmente, para a geração desses mapas foi necessário identificar as fontes de poluição em campo. Para isso foram utilizadas informações previamente disponíveis (DIAS, 2007) e confirmadas no Projeto Plano de Segurança da Água por meio de novos levantamentos de campo, envolvendo a aplicação de questionários, a inspeção local e o registro das informações por meio de sistema GPS. Nesse sentido, foram cadastradas informações relativas à existência de: aviculturas, barragens, caprinoculturas, currais, suinoculturas, nascentes, pisciculturas, fossas; pontos de lançamentos de esgoto doméstico e pontos de aplicação de agrotóxicos.

A inclusão destas variáveis como “fontes de poluição” justifica-se com base nos seguintes entendimentos (BASTOS *et al.*, 2003):

- **Caprinoculturas e suinoculturas:** instalações de criação animal onde, em geral, são gerados efluentes líquidos que são lançados diretamente em cursos d'água por meio de canalização (fontes de organismos patogênicos, sólidos em suspensão, matéria orgânica e nutrientes – nitrogênio e fósforo);
- **Aviculturas e currais:** instalações de criação animal onde em geral são gerados resíduos sólidos e, ou efluentes líquidos, mas que não são necessariamente lançados diretamente em cursos d'água por meio de canalização (fontes de organismos patogênicos, sólidos em suspensão, matéria orgânica e nutrientes – nitrogênio e fósforo);
- **Barragens e piscicultura:** represamentos dos cursos d'água, aqui agrupados, pois em sua maioria (as barragens) são utilizados para a criação de peixes (fontes de sólidos em suspensão, matéria orgânica e nutrientes – nitrogênio e fósforo, devido ao uso de ração e fertilizantes);
- **Pontos de lançamento de esgoto doméstico:** águas residuárias de habitações humanas, em geral lançadas diretamente em cursos d'água por meio de canalização (fontes de organismos patogênicos, sólidos em suspensão, matéria orgânica e nutrientes – nitrogênio e fósforo);
- **Fossas:** águas residuárias de habitações humanas, que podem ser lançadas diretamente em cursos d'água por meio de canalização (fontes de organismos patogênicos, sólidos em suspensão, matéria orgânica e nutrientes – nitrogênio e fósforo);
- **Pontos de aplicação de agrotóxicos:** locais de utilização de agroquímicos em atividades agrícolas, que podem ser carregados aos cursos d'água por escoamento superficial;
- **Nascentes:** embora não seja uma fonte de poluição, a distância em relação às nascentes deve ser levada em consideração porque são áreas de grande fragilidade para a bacia.

Em seguida, esses dados (descrição dos pontos coletados e suas respectivas coordenadas UTM) foram tabulados em formato *DBase*, o qual pode ser importado e reconhecido pelo ArcGis através do comando *Add Data*.

A fim de espacializar essas informações, ou seja, localizar espacialmente os pontos levantados no mapa em formato vetorial, foi necessário, após a adição das tabelas das fontes de poluição (contendo duas coordenadas e descrição) a camadas de informação correntes, utilizar o comando *Display XY Data*.

Porém, o programa *Idrisi Andes* executa análises multicritérios apenas com imagens em formato matricial. Por isso, a espacialização dos pontos gerada pelo ArcGis teve que ser convertida ao formato matricial através da ferramenta *Conversions Tools*, pertencente ao conjunto de ferramentas *ArcToolsBox*, na qual foi selecionada a opção *Feature To Raster*.

Nessa opção é necessário informar: a feição vetorial a ser transformada; o item da tabela cujo valor se deseja atribuir aos pontos em questão. No caso, foram utilizados o identificador (ID) dos pontos, o nome e a localização do arquivo matricial a ser gerado e o tamanho de cada célula dessa imagem.

Como inconveniente adicional, o *Idrisi Andes* não consegue ler o arquivo matricial gerado pelo *ArcGis*, sendo necessária a transformação desse arquivo para o formato de texto chamado de ASCII para isso, foi utilizado o comando *Raster to ASCII*, também pertencente a ferramenta *Conversion Tools*, com o qual é necessário apenas indicar o arquivo que se deseja transformar e o nome do novo arquivo gerado.

Além disso, o cabeçalho gerado para esse arquivo contém itens que o *Idrisi* não reconhece, sendo, por isso, necessário eliminar a sexta linha do cabeçalho e trocar as possíveis vírgulas que o arquivo possua por pontos, uma vez que o programa é americano e lê a numeração com este separador decimal.

Sequencialmente, foi necessário importar para o *Idrisi* esse arquivo ASCII, através do comando *Import*, selecionando a opção *ESRI Formats/ArcRaster*; nesse comando é necessário selecionar a imagem a ser importada, o nome da imagem a ser gerada pelo programa, além do sistema de projeção e unidades métricas da mesma.

Porém, a imagem, embora já em formato compatível ao *Idrisi*, ainda não se encontra pronta para passar pelo procedimento posterior, que visa relacionar as fontes de poluição às demais camadas de informação. A fim de torná-las aptas a passar por esse procedimento, foi necessário reclassificá-las, atribuindo o valor zero aos pixels que não representam fontes de poluição.

A fim de se gerar mapas que relacionassem as fontes de poluição à distância que elas estavam dos cursos d'água foi aplicado o módulo *Distance*, que fornece as distâncias a partir das feições existentes, como pontos, linhas e polígonos. Desta forma pode se avaliar a possibilidade da fonte pontual chegar ou não e em que quantidade a estação de tratamento (ETA).

3.4. Aplicação do método Delphi

Depois de geradas as diferentes camadas de informação, há a necessidade de se homogeneizar as escalas adotadas e ponderar cada uma das camadas a fim de executar a análise multicritério. Para executar essa tarefa de forma não tendenciosa foi utilizado o método Delphi.

O passo inicial foi a elaboração do questionário (Anexo 1) pela equipe multidisciplinar responsável pela definição das camadas de informação. O questionário foi enviado para 21 especialistas, selecionados nas áreas de Solos, Hidrologia, Recursos Hídricos e Geoprocessamento. Na elaboração do questionário, a definição prévia das diversas classes associadas a cada critério foi realizada com base opinião da equipe multidisciplinar do Projeto Plano de Segurança da Água.

Com pode ser observado no Anexo, os especialistas foram convidados a emitir as seguintes opiniões: sobre o grau de perigo (em escala de 0-100) associado as diversas classes pré-estabelecidas para cada critério, bem como para a ponderação das camadas de informação; se as classes pré-estabelecidas eram consideradas adequadas; se não, se sugeririam outro número de classes e respectivos intervalos.

Após a primeira rodada, foi obtido retorno de 30% dos questionários enviados. Apenas as respostas do 'especialista 7' diferiu de forma mais destacada das dos demais. Em virtude disso e de dificuldades práticas na execução de novas 'rodadas',

optou-se por excluir as respostas do referido especialista, considerar as demais como ‘consenso’ e dar por encerrada a consulta Delphi relativa nesse ponto, ‘Definição dos Pesos dos Critérios’.

A fim de aplicar a análise multicritério baseada nas respostas dos especialistas, há necessidade de definir os pesos para os critérios a serem levados em consideração. Para isso foram aplicados os seguintes métodos: ordenamento dos critérios; da escala diferencial semântica e da comparação par a par.

Na aplicação do método do Ordenamento dos Critérios foi inicialmente feito um *ranking* de importância de todos os critérios, tomando como referência a opinião dos especialistas (Tabela 3).

Tabela 3. Ranking utilizado no Método do Ordenamento do Critérios

CRITÉRIOS	POSIÇÃO NO RANKING
USO E OCUPAÇÃO	1
FONTES DE POLUIÇÃO	2
DECLIVIDADE	3
FLUXO ACUMULADO	4
TIPO DE SOLO	5

Em seguida, para aplicar o método da Escala Diferencial Semântica, foi necessário classificar os critérios na escala anteriormente citada. Porém, são sugeridas duas formas diferentes de se aplicar essa escala (Tabela 4): (i) atribuição da maior para a menor escala em função das respostas dos especialistas (ordem classificatória sugerida pelos especialistas) e (ii) atribuição da maior para a menor escala em função do percentual das respostas dos especialistas, levando em consideração o percentual entre um critério e o seguinte, ou seja, quando a diferença entre um critério e outro for maior que 5%, aplica-se uma redução em ‘+1’ na escala. Em ambos os casos, o peso atribuído às fontes de poluição foi dividido pelo número total de fontes, (total de 10), gerando assim o peso individual de cada fonte de poluição.

Tabela 4. Pesos atribuídos pelo método da Escala Diferencial Semântica.

Ponderação das camadas	Ordem	Escala 1	Escala 2
Uso e Ocupação	1	7	7
Dist. das Fontes de Poluição	2	6	5
Declividade	3	5	4
Fluxo Acumulado	4	4	3
Tipo de Solo	5	3	2

O método da análise hierárquica (MAH) também foi empregado para a obtenção dos pesos através do módulo *Weight* (Figura 20-a), disponível dentro do comando de análise multicritério (*Decision Wizard*). Esse modo pergunta de início se será utilizada outra comparação pré-existente ou se será executada uma nova comparação, neste caso deve-se inserir cada critério na análise (Figura 20-b).

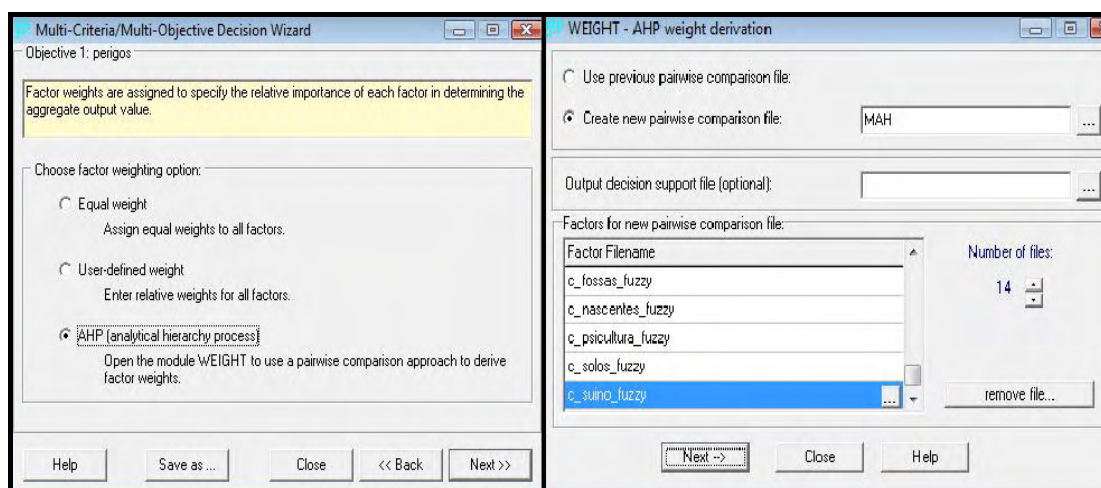


Figura 20. (a)- Seleção do módulo *Weight* dentro da análise multicritério (*Decision Wizard*) **(b)-** Seleção do número e dos critérios a serem ponderados.

Foram distribuídos os pesos de duas diferentes formas utilizando a MAH: (i) considerando 14 critérios (MAH-1) - tipo de solos, uso e ocupação da terra, fluxo acumulado, declividade e 10 diferentes fontes de poluição, sempre obedecendo à ordem de importância sugerida pelos especialistas, gerando, assim, uma matriz de comparação de 14 linhas por 14 colunas (Tabela 6); (ii) considerando apenas 5 critérios (MAH-2) - tipo de solos, uso e ocupação da terra, fluxo acumulado, declividade e fontes de poluição; conseqüentemente a matriz de comparação teve 5x5 de dimensão (Tabela 5). O peso obtido para as fontes de poluição foi dividido pelas 10 fontes gerando o peso individual de cada uma delas.

Tabela 5. Tabela de Comparação usando o Método de Análise Hierárquica considerando 5 critérios.

MAH - 2	Uso e Ocupação	Fontes de Poluição	Declividade	Fluxo Acumulado	Tipos de Solo
Uso e Ocupação	1				
Fontes de poluição	1/2	1			
Declividade	1/3	1/2	1		
Fluxo Acumulado	1/4	1/3	1/2	1	
Tipos de Solo	1/5	1/4	1/3	1/2	1

Tabela 6. Tabela de Comparação usando o Método de Análise Hierárquica considerando 14 critérios.

MAH - 1	Uso e Ocupação	Avicultura	Barragens	Caprinocultura	Curral	Agrotóxicos	Lanç. Esgoto	Fossas	Nascentes	Psicultura	Suinocultura	Declividade	Fluxo Acumulado	Tipos de Solo
Uso e Ocupação	1													
Avicultura	1/2	1												
Barragens	1/2	1	1											
Caprinocultura	1/2	1	1	1										
Curral	1/2	1	1	1	1									
Agrotóxicos	1/2	1	1	1	1	1								
Lanç. Esgoto	1/2	1	1	1	1	1	1							
Fossas	1/2	1	1	1	1	1	1	1						
Nascentes	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1					
Psicultura	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
Suinocultura	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
Declividade	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1		
Fluxo Acum.	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	
Tipos de Solo	1/5	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1

Após processar o módulo *Weight*, foram gerados os pesos individuais e o índice de inconsistência para os dois processos de comparação, ou seja, o quão coerente estão os valores inseridos na análise, atribuindo 0 ao valor mais coerente possível e 1 ao valor mais incoerente, retratando possíveis erros.

3.5. Aplicação da análise multicritério

A fim de aplicar a análise multicritério é necessário que todas as camadas de informação (imagens temáticas) possuam o mesmo número de linhas e colunas, de modo que o *software* possa processar as informações de forma integrada. Portanto, o primeiro passo necessário foi recortar todas as imagens para a mesma área de interesse através do comando *Window* (Figura 21), cujas coordenadas UTM dos extremos são: X mínimo = 718.271,234m; X máximo = 724.415,234m; Y mínimo = 7.694.424,829m e Y máximo = 7.703.781,829m; deste modo totalizando 1190 colunas e 1868 linhas em todas as imagens a serem empregadas na análise.

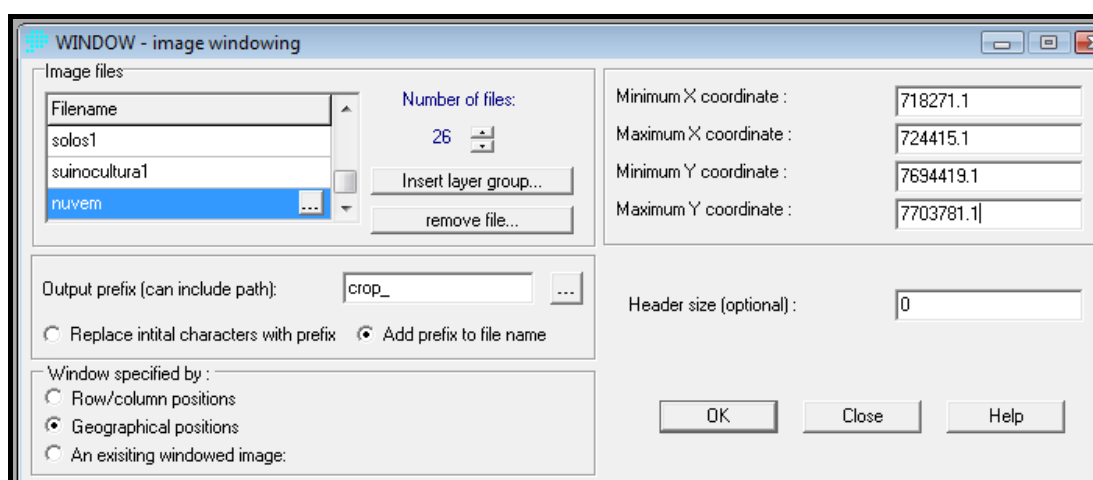


Figura 21. Comando *Window* para recorte das imagens considerando os extremos considerados.

Em seguida foi utilizado o módulo *Decision Wizard* do software Idrisi Andes, que é uma ferramenta que executa a análise multicritério. Inicialmente, é solicitado ao usuário que informe o nome da análise a ser criada (Figura 22a) e, sequencialmente, o objetivo final da mesma (Figura 22b), nesse caso, identificar as áreas que representam (ou que incluem) maiores perigos para o abastecimento de água.

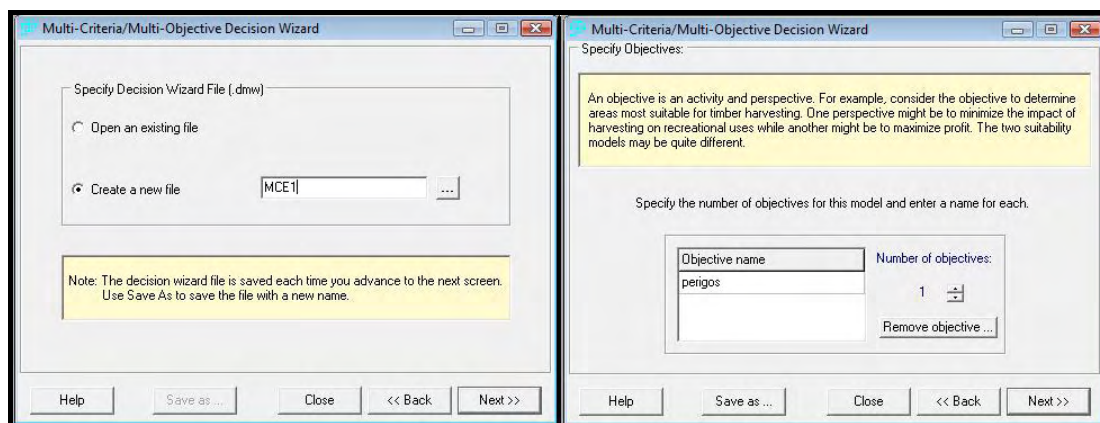


Figura 22.(a)- Exemplo de janela solicitando o nome da análise a ser gerada. **(b)-** Exemplo de janela solicitando o objetivo da análise.

Na próxima etapa da análise, a ferramenta pede que sejam informadas as restrições (Figura 23a), ou seja, as regiões que devam ser excluídas da análise por algum motivo. Nesse caso, foi inserido como restrição o limite da bacia, uma vez que os perigos existentes fora da área de drenagem não impactam a qualidade da água na mesma.

Sequencialmente há necessidade de inserir os critérios na análise e informar se cada um deles precisa ou não ser convertido para a lógica *fuzzy*. E, em caso negativo, há necessidade de informar o nome do arquivo sob a lógica *fuzzy* a ser gerado para aquele critério (Figura 23b).

Portanto, foram inseridos na análise: o mapa de tipos de solo, de declividade, de uso e ocupação, de fluxo acumulado e das distâncias das fontes de poluição. Os mapas de distância das fontes de poluição ainda não se encontravam sob esta lógica, ao contrário dos demais, conseqüentemente, a próxima etapa consistiu em informar parâmetros para inserção dos mesmos na lógica *fuzzy*.

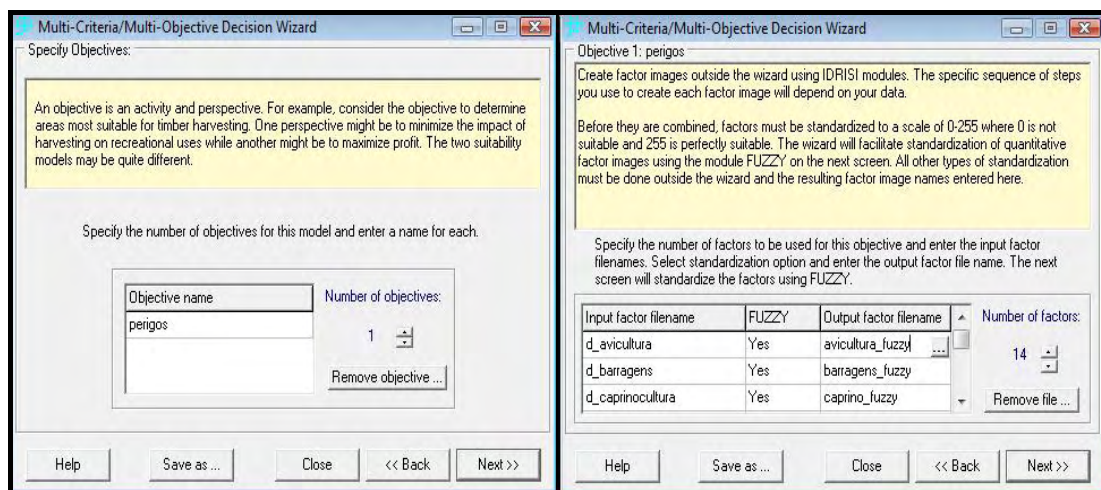


Figura 23.(a)- Exemplo de janela solicitando as restrições que compõe a análise.
(b)- Exemplo de janela solicitando os critérios e questionando se os mesmos precisam ou não ser convertidos para a lógica *fuzzy*.

Na transformação de cada mapa de distância das fontes de poluição para lógica *fuzzy*, o programa solicita que seja informado o tipo de função que descreve de forma mais adequada à transformação, ou seja, se o grau de perigo cresce ou decresce em função da distância (função crescente ou decrescente); além disso, é preciso informar a distância inicial e final de perigo máximo e/ou mínimo (pontos de controle C e D) (Figura 24). A Tabela 7 mostra os valores adotados na transformação dos mapas de distância das fontes de poluição para *fuzzy*.

Tabela 7. Tipo de função e pontos de controle utilizados na transformação dos critérios para *fuzzy*.

Fontes de Poluição	Tipo de Função	Fuzzy 2	
		Ponto de controle C (m)	Ponto de Controle D (m)
Avicultura	Monótona Decrescente	500	3000
Barragens	Monótona Decrescente	500	3000
Caprinocultura	Monótona Decrescente	500	3000
Curral	Monótona Decrescente	500	3000
Defensivos Agrícola	Monótona Decrescente	1000	5000
Lançamento Esgoto	Monótona Decrescente	500	2000
Fossas	Monótona Decrescente	500	2000
Nascentes	Monótona Decrescente	500	1000
Psicultura	Monótona Decrescente	500	3000
Suinocultura	Monótona Decrescente	1000	5000

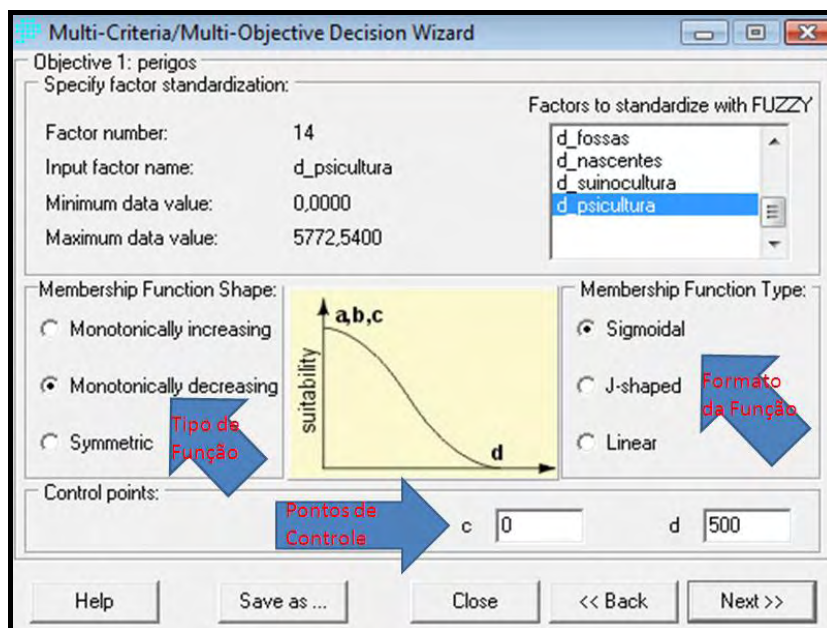


Figura 24- Itens necessários na conversão do mapa de distância para lógica *fuzzy*: tipo de função (crescente ou decrescente), formato da função e pontos de controle.

Após essa etapa, o módulo *Decision Wizard* questiona o usuário sobre a forma como os pesos serão distribuídos (pesos iguais, pesos pré-definidos, ou a opção de utilizar o módulo *Weight* para geração dos pesos). Nessa análise os pesos foram pré-definidos por diferentes métodos, sendo então utilizada a opção pesos pré-definidos (Figura 25a); na sequência são solicitados os pesos respectivos de cada critério (Figura 25b).

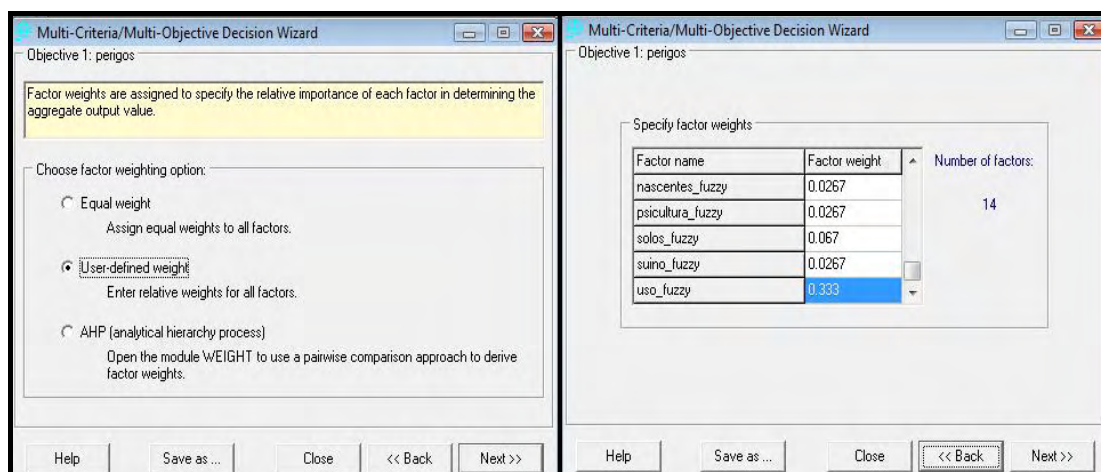


Figura 25-(a). Definição da forma que serão distribuídos os pesos. **(b).** Inserção dos pesos pré-determinados por um dos métodos de ponderação.

Desta forma foram realizadas sete análises diferentes, alterando apenas o método de ponderação e a forma de combinação dos critérios (WLC e OWA),

formando, portanto, as seguintes combinações entre critérios: (i) Pesos baseados no ordenamento dos critérios usando WLC; (ii) pesos baseados no ordenamento dos critérios usando OWA risco máximo; (iii) pesos baseados no ordenamento dos critérios usando OWA compensação máxima; (iv) Escala diferencial semântica 1, usando WLC; (v) Escala diferencial semântica 2, usando WLC; (vi) método da análise hierárquica 1 usando WLC e (vii) método da análise hierárquica 2 usando WLC.

Sequencialmente, de forma a facilitar a interpretação desses mapas de fragilidade e futuras comparações com os índices de qualidade da água, esses mapas de fragilidade foram divididos em categorias de perigos (Tabela 8). Adotou-se aqui, ouvida a equipe de especialistas do Projeto Plano de Segurança da Água, o mesmo critério assumido em trabalho similar realizado por Portes (2008).

Tabela 8. Classes de perigos para a qualidade da água.

Classes	Grau de Perigo
Muito Baixo	0 - 25
Baixo	25 - 40
Médio	40 - 50
Alto	50 - 70
Muito Alto	70 - 100

Para realização desse procedimento foi utilizado o comando *reclass*, aplicado em cada um dos mapas de perigos gerados para sua posterior edição no ArcGis (inserção de caneová, orientação e legendas)

3.6. Espacialização dos Índices de Qualidade da Água

Durante o período de um ano (2008), no âmbito do Projeto Plano de Segurança da Água, foram coletadas amostras de água mensalmente em diferentes pontos da bacia de captação de forma a obter um perfil da qualidade da água. Em nove desses 12 meses, além dos parâmetros necessários para o cálculo do IQA-NFS de acordo com a Equação 1 (Tabela 9) foram coletados dados de metais pesados e substâncias que alteram as características organolépticas da água, possibilitando o cálculo do Índice de Qualidade da Água Bruta para Fins de Abastecimento Público (IAP) de acordo com a Equação 3 (Tabela 10). Os pontos de amostragem foram selecionados de forma a representar: (i) a contribuição em cada sub-bacia de drenagem - São Lucas (SB1), Córrego dos Machados (SB2), Córrego Santa Catarina (SB3), Córrego

Paraíso (SB4), Córrego Palmital (SB5), Córrego Antuérpia (SB6), Córrego do Engenho (SB7); (ii) sub-bacia do Ribeirão São Bartolomeu (SB8), representando a contribuição acumulada das sub-bacias ao Ribeirão São Bartolomeu, somada às próprias contribuições de drenagem da área mais à jusante da bacia (já se aproximando dos reservatórios de acumulação no campus universitário); e (iii) um ponto em cada um dos reservatórios de acumulação de água em série no campus da UFV ‘Lagoas da UFV’ – sendo o segundo coincidente com o ponto de captação de água (PCL) (Figura 15).

Tabela 9. Índice de Qualidade da Água - (IQA-NSF) na bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009, Viçosa-MG.

Sub-bacias	Coletas realizadas em 2008												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Córrego São Lucas (SB 1)	69	67	59	51	55	51	69	62	63	61	55	48	59
Córrego dos Machados (SB 2)	71	71	67	44	66	55	56	71	64	62	58	57	62
Córrego Santa Catarina (SB 3)	61	61	56	53	57	48	55	64	67	62	57	47	57
Córrego Paraíso (SB 4)	62	64	67	59	55	56	63	70	49	71	59	57	61
Córrego Palmital (SB 5)	53	57	57	41	64	39	51	66	68	54	44	36	52
Córrego Antuérpia (SB 6)	70	66	57	60	60	49	54	75	80	68	59	64	63
Córrego do Engenho (SB 7)	36	61	47	50	53	45	57	59	65	61	59	39	53
R. São Bartolomeu (SB 8)	45	53	44	45	55	47	67	61	57	59	56	57	54
Ponto de captação lagoa 1	65	64	65	64	55	65	67	61	76	68	69	61	65
Ponto de captação lagoa 2	67	56	63	64	52	65	66	58	72	79	66	59	64

Tabela 10. Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público (IAP) na bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu de fevereiro a outubro de 2008, Viçosa-MG.

Sub-bacias	Coletas realizadas em 2008									Média
	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	
Córrego São Lucas (SB 1)	7,746	7,082	0,162	0,073	0,668	51,441	0,101	10,381	0,137	8,523
Córrego dos Machados (SB 2)	6,556	6,669	0,331	0,175	0,136	52,273	0,076	3,654	0,172	7,896
Córrego Santa Catarina (SB 3)	5,501	4,974	0,056	0,117	0,384	38,742	0,107	3,011	0,054	5,314
Córrego Paraíso (SB 4)	11,121	5,705	0,030	0,182	0,438	35,295	0,057	8,315	0,124	7,654
Córrego Palmital (SB 5)	7,979	2,838	0,047	0,069	0,175	54,488	0,073	4,369	0,052	6,502
Córrego Antuérpia (SB 6)	5,045	2,252	0,023	0,158	0,206	37,027	0,027	2,948	0,120	4,584
Córrego do Engenho (SB 7)	6,752	2,218	0,017	0,138	0,171	32,647	0,018	6,383	0,025	4,697
R. São Bartolomeu (SB 8)	7,096	0,536	0,011	0,175	0,079	37,768	0,019	3,354	0,045	5,379
Ponto de captação lagoa 1	10,247	23,517	0,038	0,029	0,366	43,549	0,018	3,771	0,023	8,348
Ponto de captação lagoa 2	7,213	17,865	0,017	0,036	0,423	52,351	0,011	2,485	0,030	8,304

Como cada um desses pontos de coleta reflete a área de contribuição de cada sub-bacia, optou-se por espacializar os índices de qualidade da água também por sub-

bacia e não através de interpolação, pois, nesse último caso, isso generalizaria os índices em regiões impróprias.

Para realização desse procedimento foi utilizada uma imagem com os limites das sub-bacias em formato *shape*, que foram exportados em ASC II para que o Idrisi pudesse processá-las. No Idrisi foi utilizado o comando *Reclass*, sendo atribuídos os respectivos valores de IQA médio (dos doze meses de monitoramento) e IPA médio (dos nove meses de monitoramento) aos pixels pertencentes às sub-bacias, assim como as classificações desses índices (ótimo, bom, ruim, regular e péssimo). Dessa forma foram gerados quatro mapas: (i) mapa com os IQAs médios dos nove meses de monitoramento das sub-bacias; (ii) mapa com os IQAs médios classificados; (iii) mapa com os IAPs médios dos nove meses de monitoramento das sub-bacias e (iv) mapa com os IAPs médios classificados.

Após a espacialização dos índices de qualidade da água, esses mapas foram comparados aos mapas de perigos gerados a partir da análise multicritério, de modo a comparar os métodos de ponderação e de combinação dos critérios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo consistem basicamente: resultado da homogeneização gerado pelos especialistas; ranking de importância dos critérios gerados pelos especialistas; pesos gerados através dos diferentes métodos; mapas relativos aos critérios (uso e ocupação, fluxo acumulado, tipos de solo, declividade e distância das fontes de poluição); mapas de risco gerados através da análise multicritério e mapas dos índices de qualidade da água para a bacia de contribuição.

4.1. Resultados do método Delphi de consulta a especialistas

A Tabela 11 retrata o resultado da primeira rodada do questionário e as análises estatísticas cabíveis, de modo a identificar possíveis discrepâncias nos resultados obtidos.

Após essa rodada, foi observado que o especialista número 7 divergia dos demais na maioria de suas avaliações, por esse motivo suas respostas foram excluídas do cálculo final da estatística descritiva das respostas (média, mediana, primeiro e terceiro quartis) (Tabela 12).

A partir dos resultados obtidos, as diferentes camadas de informação foram devidamente reescaladas e cada uma foi 'ranqueada' de acordo com sua ordem de importância (Tabela 13).

Tabela 11. Respostas enviadas pelos especialistas na primeira rodada do método Delphi e suas respectivas estatísticas.

ITENS AVALIADOS	ESPECIALISTAS							ESTATÍSTICAS			
	1	2	3	4	5	6	7	Média	Mediana	1° Q*	3° Q*
Declividade (%)	Grau de perigo (0-100)										
< 3	1	5	10	1	5	1	80	14,71	5	1	10
3 a 8	10	30	30	10	25	10	80	27,86	25	10	30
8 a 20	30	50	50	50	50	30	60	45,71	50	40	50
20 a 45	80	75	75	100	70	60	40	71,43	75	65	80
45 a 75	100	100	100	100	100	80	20	85,71	100	90	100
> 75	100	100	100	100	100	100	10	87,14	100	100	100
Q* = Quartil											
Solos	Grau de perigo (0-100)										
Cambissolo Háplico	20	60	75	-----	100	-----	50	61,00	60	50	75
Latossolo Vermelho-Amarelo	60	25	30	-----	50	-----	20	37,00	30	25	50
Argissolo Vermelho-Amarelo	40	20	20	-----	25	-----	20	25,00	20	20	25
Uso e ocupação da terra	Grau de perigo (0-100)										
Olericultura	60	80	75	100	50	60	100	75,00	75	60	90
Café	60	65	50	30	50	50	60	52,14	50	50	60
Culturas anuais (milho/feijão)	60	70	75	50	50	50	60	59,29	60	50	70
Solo Exposto	70	85	90	90	75	30	80	74,29	80	75	85
Áreas urbanas	100	100	100	-----	100	100	100	100,00	100	100	100
Pastagem degradada	70	50	75	30	25	80	40	52,86	50	35	75
Pastagem não degradada	70	40	50	20	15	70	30	42,14	40	25	70
Formações florestais	1	1	0	1	5	10	1	2,71	1	1	5
Fluxo acumulado	Grau de perigo (0-100)										
Acima de 25000 m ² **	-----	100	100	-----	100	100	100	100,00	100	100	100
6250 a 25000 m ² *	-----	80	75	-----	50	75	80	72,00	75	75	80
1250 a 6250 m ² *	-----	60	50	-----	25	50	60	49,00	50	50	60
0 a 1250 m ² *	-----	40	25	-----	5	25	40	27,00	25	25	40
* de contribuição; ** próprio curso d'água											
Ponderação das camadas	Grau de perigo (0-100)										
Uso e Ocupação	100	100	100	90	75	90	100	93,57	100	90	100
Declividade	50	60	50	70	50	70	40	55,71	50	50	70
Tipo de Solo	50	40	75	30	25	30	40	41,43	40	30	50
Fluxo Acumulado	-----	50	25	-----	50	50	60	47,00	50	50	50
Dist. das Fontes de Poluição	80	80	75	70	50	-----	90	74,17	80	71,3	80

Tabela 12. Respostas enviadas pelos especialistas na primeira rodada do método Delphi (excluindo o especialista número 7) e suas respectivas estatísticas.

ITENS AVALIADOS	ESPECIALISTAS						ESTATÍSTICAS SEM ESPECIALISTA 7			
	1	2	3	4	5	6	Média	Mediana	1°Q*	3°Q*
Declividade (%)	Grau de perigo (0-100)									
< 3	1	5	10	1	5	1	3,83	5	5	5
3 a 8	10	30	30	10	25	10	19,17	25	10	30
8 a 20	30	50	50	50	50	30	43,33	50	30	50
20 a 45	80	75	75	100	70	60	76,67	75	70	80
45 a 75	100	100	100	100	100	80	96,67	100	100	100
> 75	100	100	100	100	100	100	100,00	100	100	100
Q* = Quartil										
Solos	Grau de perigo (0-100)									
Cambissolo Háplico	20	60	75	-----	100	-----	63,75	60	50	75
Latossolo Vermelho-Amarelo	60	25	30	-----	50	-----	41,25	30	25	50
Argissolo Vermelho-Amarelo	40	20	20	-----	25	-----	26,25	20	20	25
Uso e ocupação da terra	Grau de perigo (0-100)									
Olericultura	60	80	75	100	50	60	70,83	75	60	80
Café	60	65	50	30	50	50	50,83	50	50	60
Culturas anuais (milho/feijão)	60	70	75	50	50	50	59,17	55	50	70
Solo Exposto	70	85	90	90	75	30	73,33	80	70	90
Áreas urbanas	100	100	100	-----	100	100	100,00	100	100	100
Pastagem degradada	70	50	75	30	25	80	55,00	60	35	75
Pastagem não degradada	70	40	50	20	15	70	44,17	50	20	70
Formações florestais	1	1	0	1	5	10	3,00	1	1	5
Fluxo acumulado	Grau de perigo (0-100)									
Acima de 25000 m ² **	-----	100	100	-----	100	100	100,00	100	100	100
6250 a 25000 m ² *	-----	80	75	-----	50	75	70,00	75	75	75
1250 a 6250 m ² *	-----	60	50	-----	25	50	46,25	50	25	50
0 a 1250 m ² *	-----	40	25	-----	5	25	23,75	25	25	25
* de contribuição ; ** próprio curso d'água										
Ponderação das camadas	Grau de perigo (0-100)									
Uso e Ocupação	100	100	100	90	75	90	92,50	95	90	100
Declividade	50	60	50	70	50	70	58,33	60	50	70
Tipo de Solo	50	40	75	30	25	30	41,67	40	30	50
Fluxo Acumulado	-----	50	25	-----	50	50	43,75	50	50	50
Dist. das Fontes de Poluição	80	80	75	70	50	-----	71,00	80	70	80

Tabela 13. Grau de Perigo e importância atribuído de acordo com o método Delphi

Declividade (%)	Ponderação	Uso e ocupação da terra	Ponderação
< 3	5	Olericultura	70
3 a 8	20	Café	50
8 a 20	45	Culturas anuais (milho/feijão)	60
20 a 45	75	Solo Exposto	75
45 a 75	100	Áreas urbanas	100
> 75	100	Pastagem degradada	55
		Pastagem não degradada	45
		Formações florestais	1

Solos	Ponderação	Fluxo acumulado	Ponderação
Cambissolo Háplico	65	Acima de 25000 m ² **	100
Latossolo Vermelho-Amarelo	40	6250 a 25000 m ² *	75
Argissolo Vermelho-Amarelo	20	1250 a 6250 m ² *	50
		0 a 1250 m ² *	25
	Importância		
Ponderação das camadas	Ordem	Ponderação	Percentual (%)
Uso e Ocupação	1	95	30,16
Declividade	3	60	19,05
Tipo de Solo	5	40	12,70
Fluxo Acumulado	4	50	15,87
Dist. das Fontes de Poluição	2	70	22,22

Como pode ser observado na Tabela 13 o *ranking* percentual estabelecido pelos especialistas confere um grande destaque para o critério ‘uso e ocupação da terra’, o qual, além de obter a primeira colocação, registra uma diferença de aproximadamente 8% em relação ao segundo colocado (‘distância das fontes de poluição’); registre-se que essa foi a maior diferença observada entre um critério no *ranking* e seu subsequente.

4.2. Resultados da aplicação dos diferentes métodos de ponderação

Com base no Método do Ordenamento dos Critérios, e seguindo a ordem pré-estabelecida pelos especialistas, foram obtidos os pesos mostrados na Tabela 14.

Tabela 14. Pesos atribuídos pelo método do Ordenamento dos Critérios.

Ponderação das camadas	Ordem	Pesos	Porcentagem (%)
Uso e Ocupação	1	0,333	33,3
Dist. das Fontes Poluentes	2	0,267	26,7
Declividade	3	0,200	20
Fluxo Acumulado	4	0,133	13,3
Tipo de Solo	5	0,067	6,7

A aplicação do segundo método de ponderação (Método da Escala Diferencial Semântica), em suas duas variantes gerou resultados muito próximos ao primeiro método, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15. Pesos atribuídos pelo Método da Escala Diferencial Semântica.

Ponderação das camadas	Ordem	Escala 1	Escala 2	Peso Esc.1	Peso Esc.2
Uso e Ocupação	1	7	7	0,28	0,333
Dist. das Fontes Poluentes	2	6	5	0,24	0,238
Declividade	3	5	4	0,20	0,190
Fluxo Acumulado	4	4	3	0,16	0,143
Tipo de Solo	5	3	2	0,12	0,096

O último método de ponderação empregado (Método da Análise Hierárquica – MAH), também aplicado de duas diferentes formas (MAH 1- Considerando cada uma das fontes de poluição como um critério de posição igual e de ordem 2 no ranking e MAH 2- Considerando as dez fontes de poluição como um único item de ordem 2 no ranking e dividindo o pesos resultante por cada um deles após o processo), provocou os resultados mais diferenciados em relação aos demais métodos, como pode ser observado na Tabela 16.

Tabela 16. Resultados do Método de Análise Hierárquica

Critérios	MAH - 1	MAH - 2
Uso e Ocupação	0,1425	0,4185
Avicultura	0,07656	0, 2625 total, ou 0,02625 por critério
Barragens	0,07656	
Caprinocultura	0,07656	
Curral	0,07656	
Defensivos Agrícolas	0,07656	
Lançamento Esgoto	0,07656	
Fossas	0,07656	
Nascentes	0,07656	
Psicultura	0,07656	
Suinocultura	0,07656	
Declividade	0,0419	0,1599
Fluxo Acumulado	0,0271	0,0973
Tipo de Solo	0,0229	0,0618
Índice de Inconsistência	0,02	0,01

Em resumo, a aplicação do método MAH 1 resultou em grande importância as fontes de poluição, as quais, juntas, responderam por 76,56% do total dos pesos atribuídos, conseqüentemente, minimizando a importância das demais camadas de informação. Em contrapartida, o método MAH 2 proporcionou uma divisão mais homogênea dos pesos entre as diversas camadas.

4.3. Mapas dos Critérios

As Figuras 26 e 27 apresentam dois dos dez mapas de distância dos cursos d'água às fontes de poluição, respectivamente: currais, fossas. No geral, há concentração das fontes de poluição na área que parte da região central da bacia até a região extremo sul.

A Figura 28 mostra a distribuição espacial dos diferentes tipos de solos presentes na região da bacia, é evidenciada a predominância do Latossolo Vermelho amarelo.

A Figura 29 mostra as diferentes classes de declividade percentuais da bacia, em mapa gerado através do Modelo Digital de Elevação (MDE), originado das curvas de nível da região. Fica evidente que a região possui declividade acentuada (se trata de uma região montanhosa), na qual predominam declividades acima de 20%.

O mapa de fluxo acumulado foi gerado através do Modelo Digital de Elevação, eliminando as depressões espúrias para o cálculo da quantidade de contribuição para cada célula da imagem. Na Figura 30, se observa a predominância de áreas com contribuição de fluxo variando de 0 a 1250m².

Finalmente, a Figura 31 apresenta a distribuição espacial das classes de uso e ocupação da terra de interesse para a bacia do Ribeirão São Bartolomeu, gerado através da vetorização das feições reconhecidas na ortoimagem. Como pode ser observado, há grande percentual de culturas anuais distribuídas pela imagem (milho e feijão, entre outras) e de pastagens degradadas; observa-se ainda percentual relativamente elevado de formações florestais e que a ocupação urbana se concentra na zona norte da bacia.

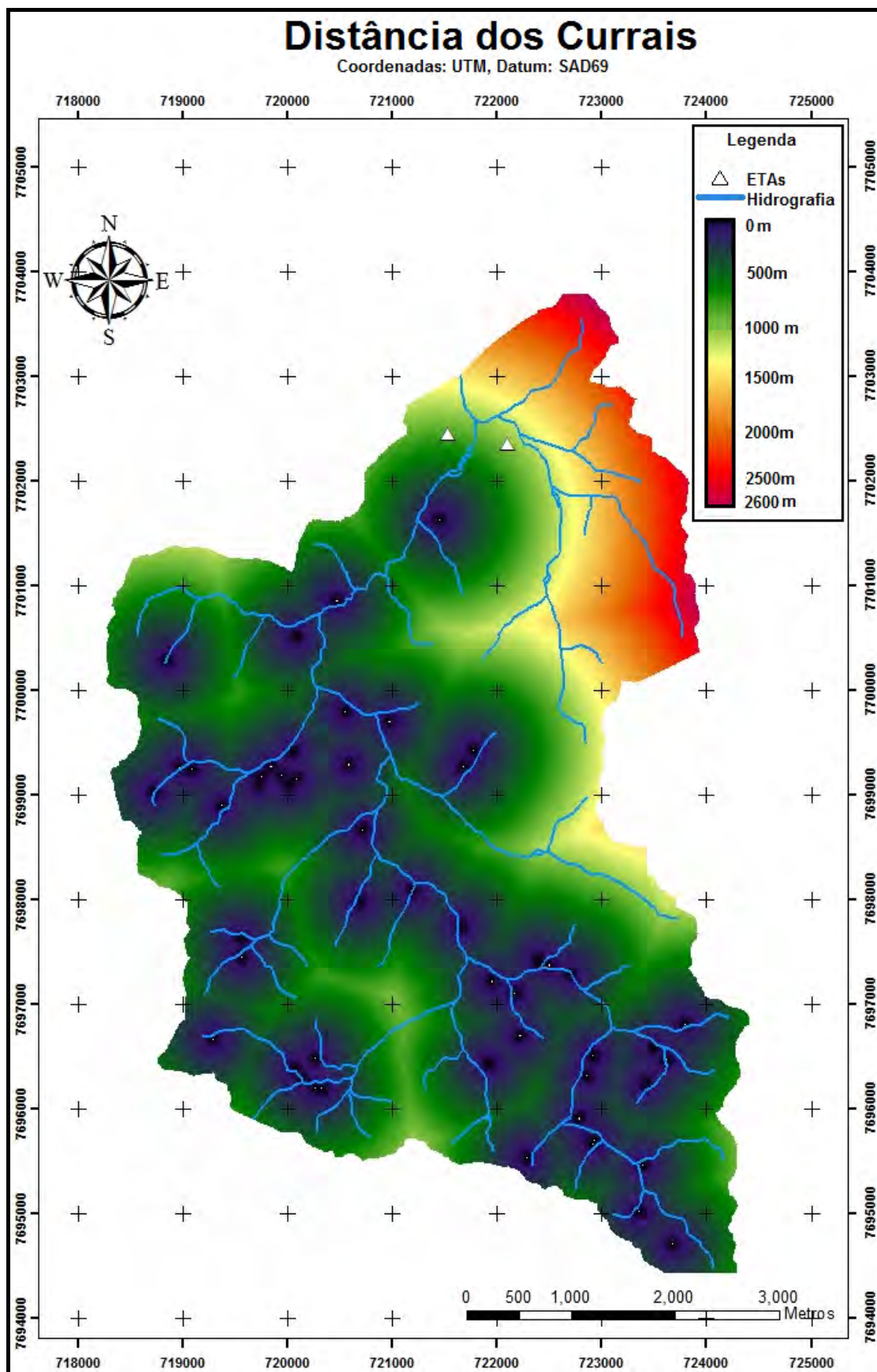


Figura 26. Mapa de distância dos Currais (Fonte de Poluição), bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

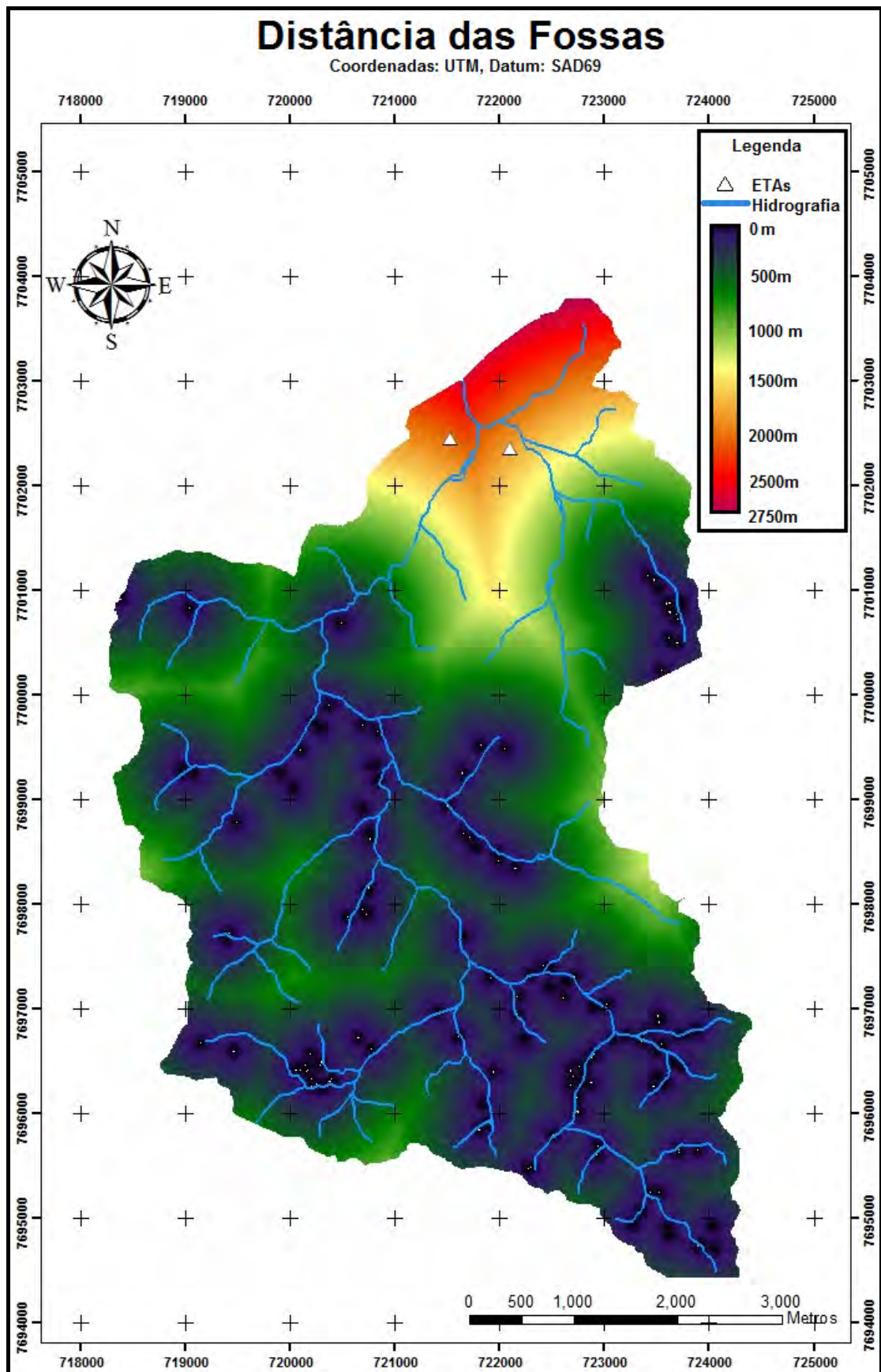


Figura 27. Mapa de distância das Fossas (Fonte de Poluição), bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

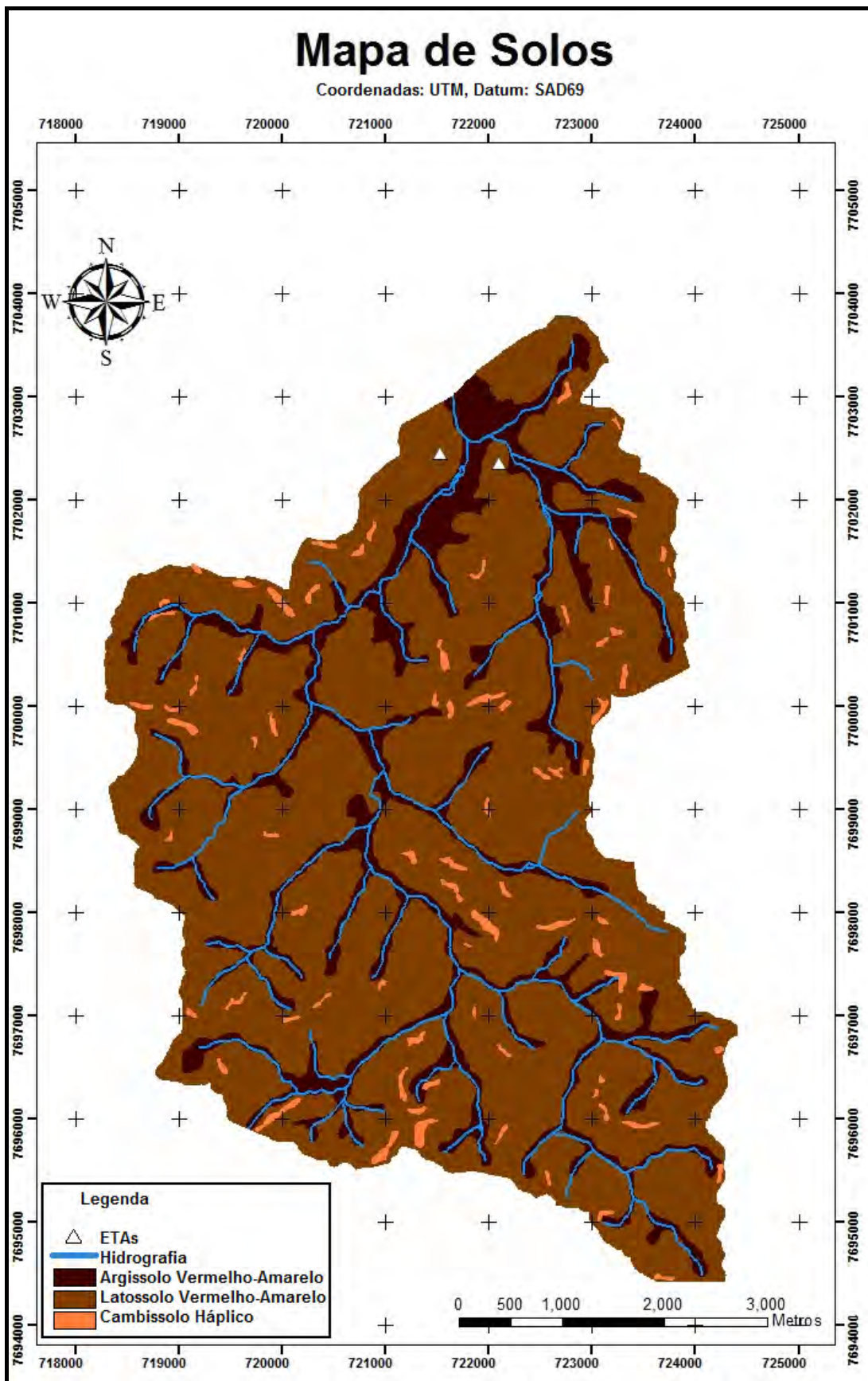


Figura 28. Mapa de tipos de solos da bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

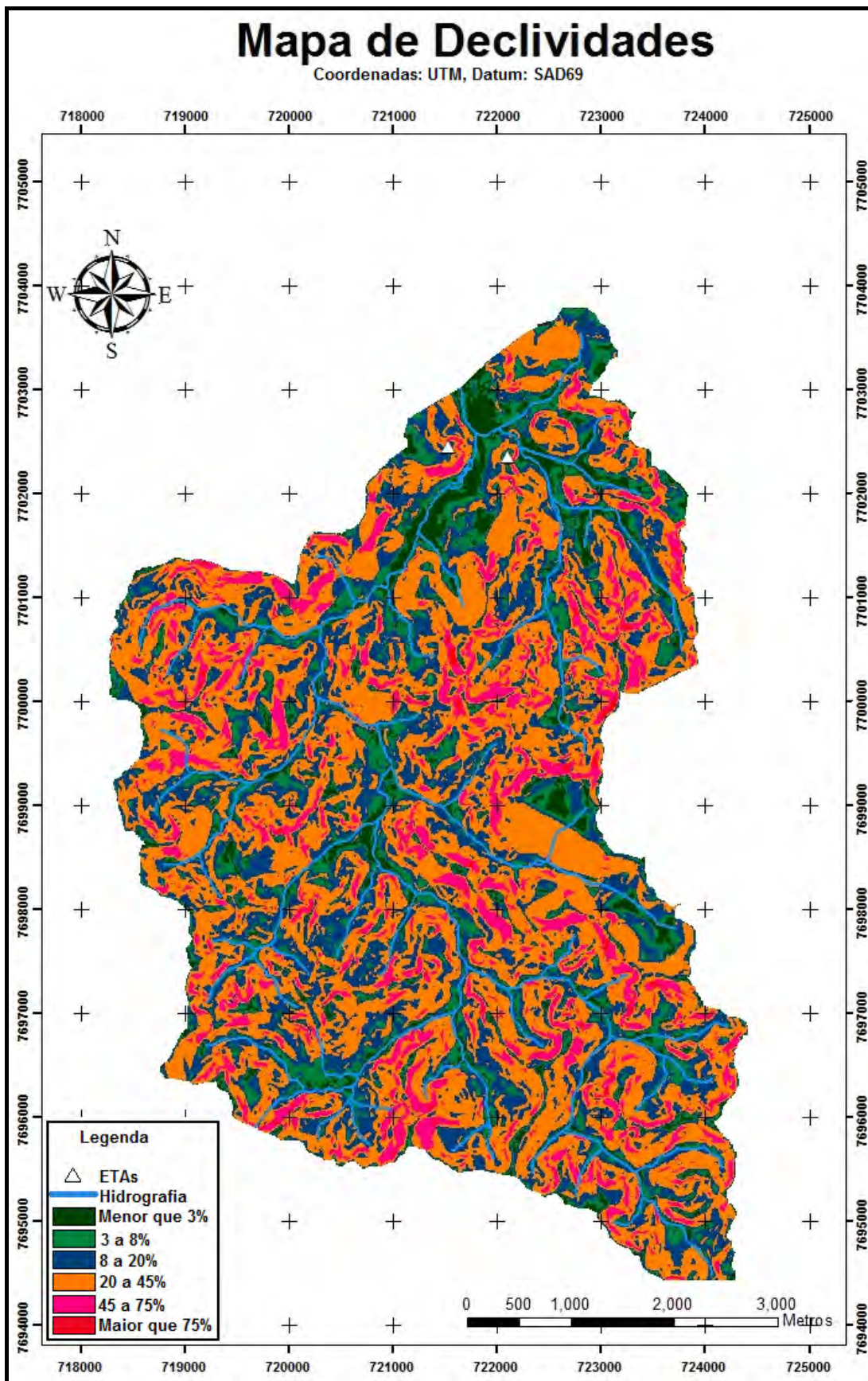


Figura 29. Mapa de Declividades percentuais agrupadas por intervalos, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

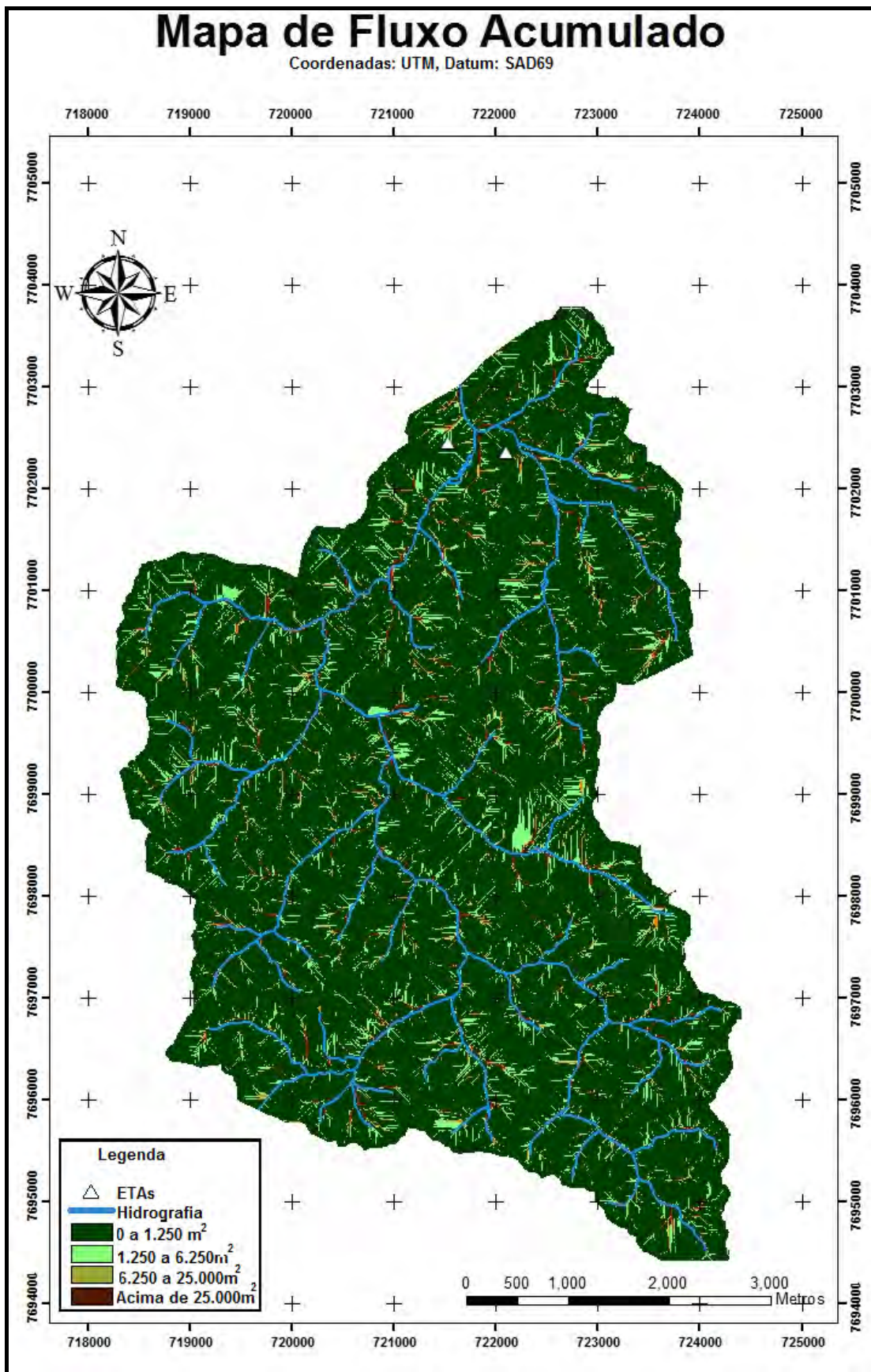


Figura 30. Mapa de Fluxo Acumulado de água dividido em classes, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

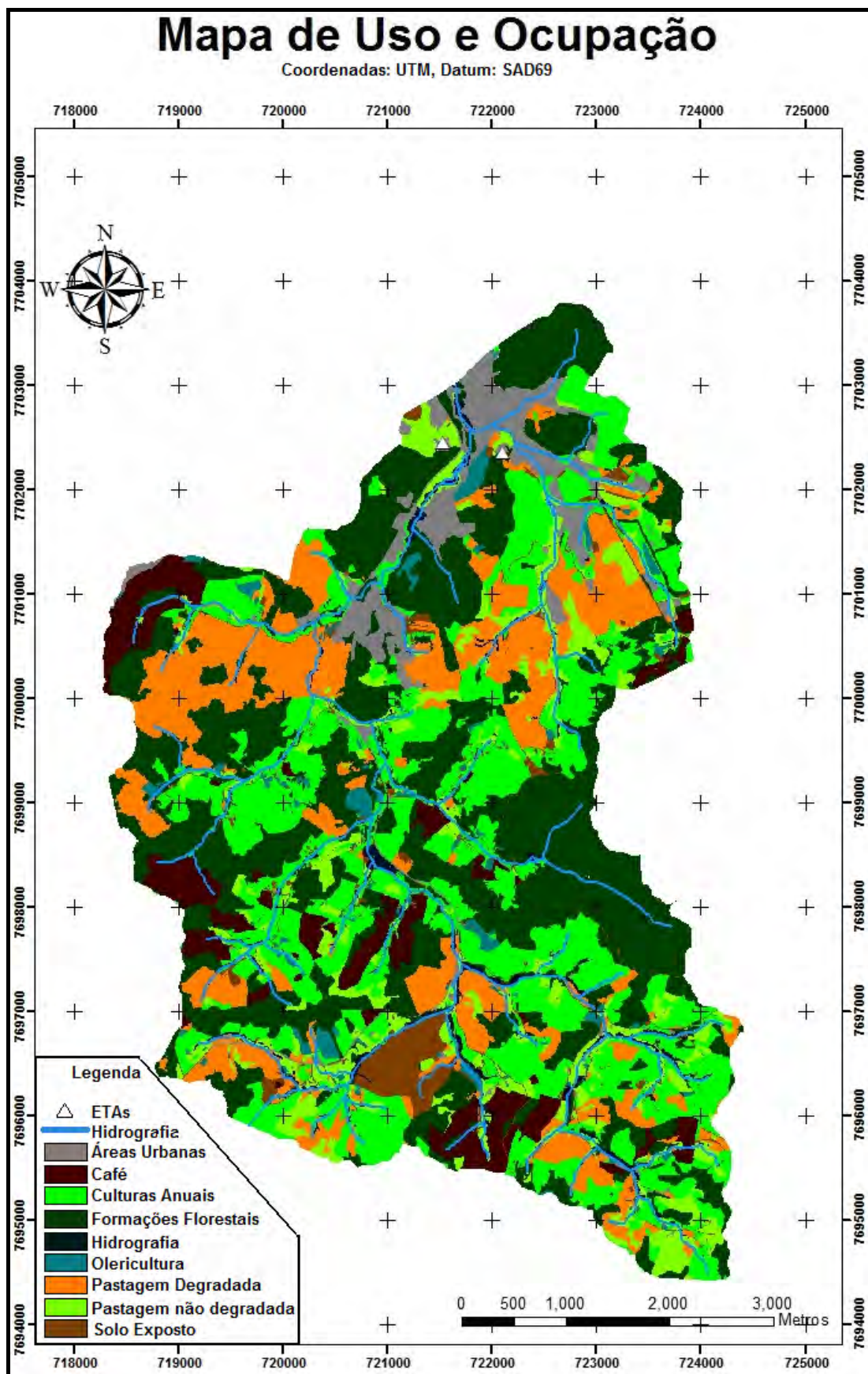


Figura 31. Mapa de uso e ocupação da terra gerados através de vetorização da ortoimagem, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

4.4. Mapas de fragilidade

A Figura 32 apresenta o mapa de fragilidade gerado a partir do método de ponderação do Ordenamento dos Critérios e da técnica de combinação WLC. É possível observar: (i) a predominância de grau de perigo alto (51 a 70%), (ii) uma área de grau de perigo de médio a muito baixo na área situada no extremo norte da bacia, e (iii) um grande foco (área ao sul da bacia), acompanhado de focos pequenos espalhados considerados como de grau de perigo muito alto (71 a 100% de risco) para a bacia.

Na sequência, a Figura 33 mostra o mapa de fragilidade gerado a partir do método de ponderação do Ordenamento dos Critérios e da técnica de combinação OWA com risco máximo. É possível observar que o método de combinação saturou toda a imagem com grau de perigo muito alto (71 a 100%), exceto numa pequena região ao norte. Porém, esse fato já era esperado, em se tratando de um dos graus de risco extremos do OWA. Face à tal resultado, optou-se por usar o OWA com risco máximo apenas com um dos métodos de ponderação empregados (ordenamento dos critérios).

A Figura 34 mostra o mapa de fragilidades gerado a partir do método de ponderação do Ordenamento dos Critérios e da técnica de combinação OWA com compensação máxima. Boa parte da imagem foi saturada ao extremo inferior, ou seja, ausência de perigos (0%), enquanto o restante da área foi classificada como grau de perigo (ou fragilidade) muito baixo ou baixo. Portanto, assim como no caso anterior, optou-se por aplicar o OWA risco mínimo apenas sobre o método de ponderação de ordenamento dos critérios.

Em seguida, as Figuras 35 e 36 mostram os mapas de fragilidades gerados a partir do método de ponderação da Escala Diferencial Semântica e da técnica de combinação WLC. É possível observar a predominância de grau de perigo alto (51 a 70%) em ambos os mapas, além de uma área de grau de perigo que oscila de médio a muito baixo na área situada no extremo norte da bacia.

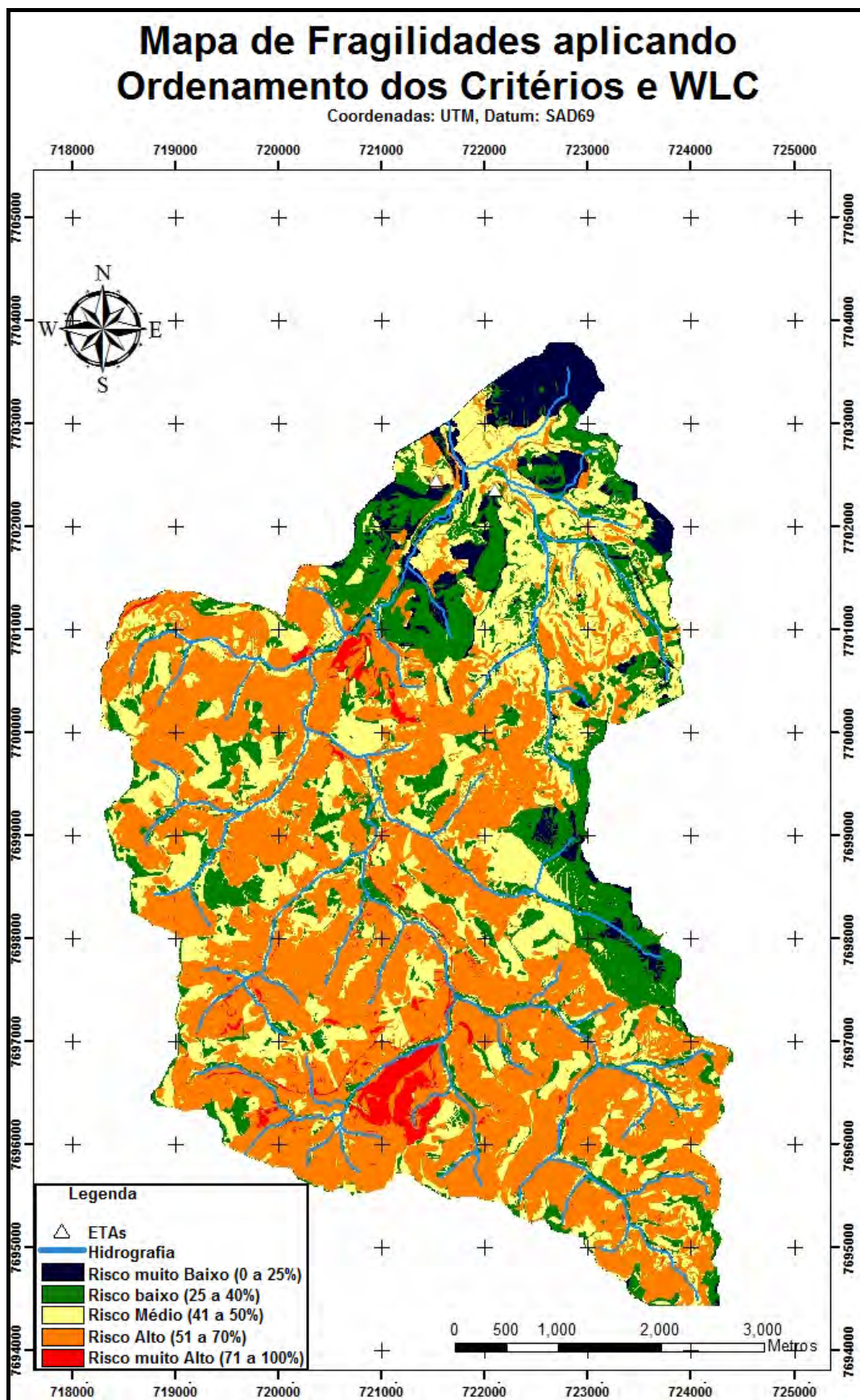


Figura 32. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método de Ordenamento dos Critérios para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

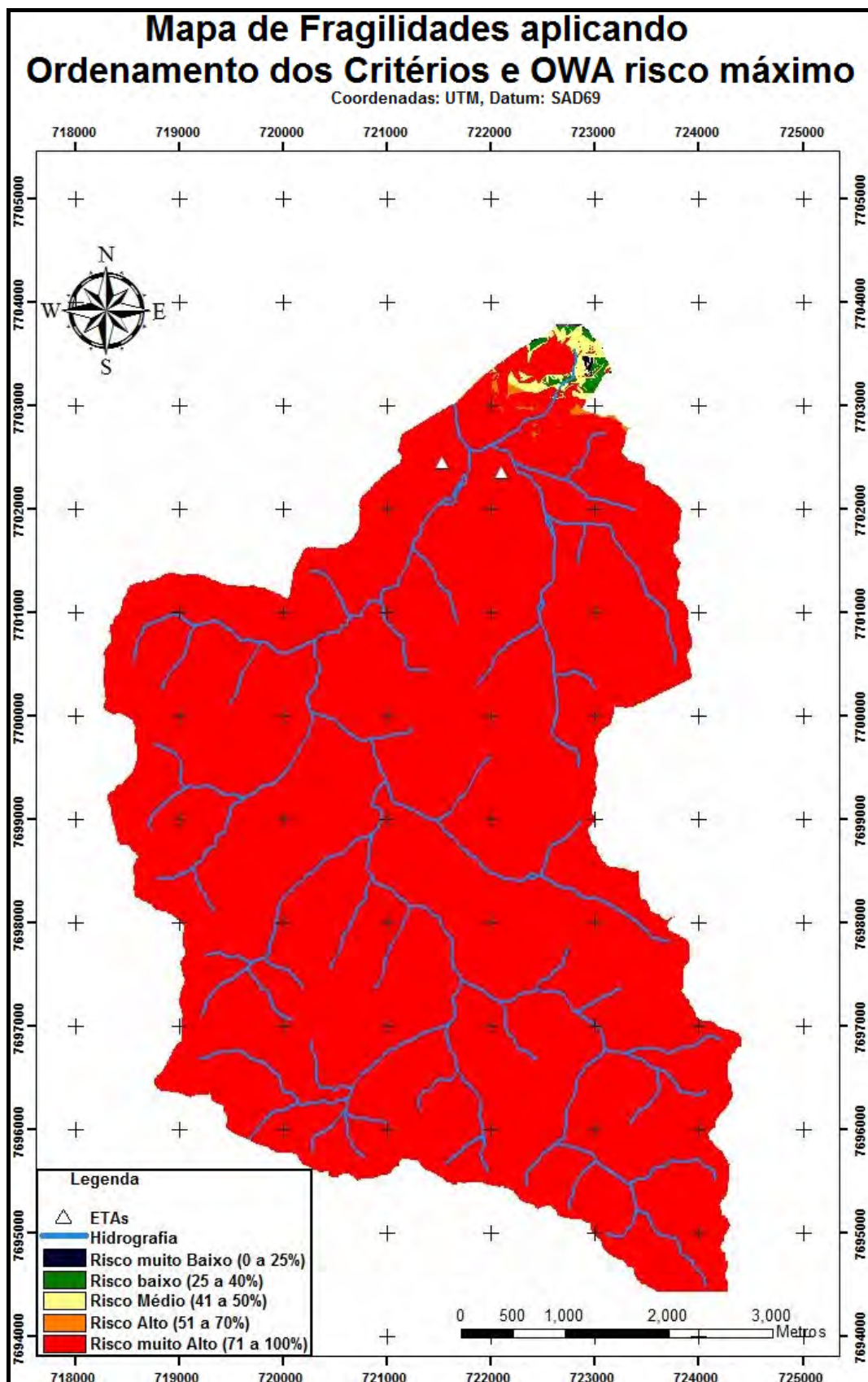


Figura 33. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método de Ordenamento dos Critérios para geração dos pesos e do método OWA considerando risco máximo para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

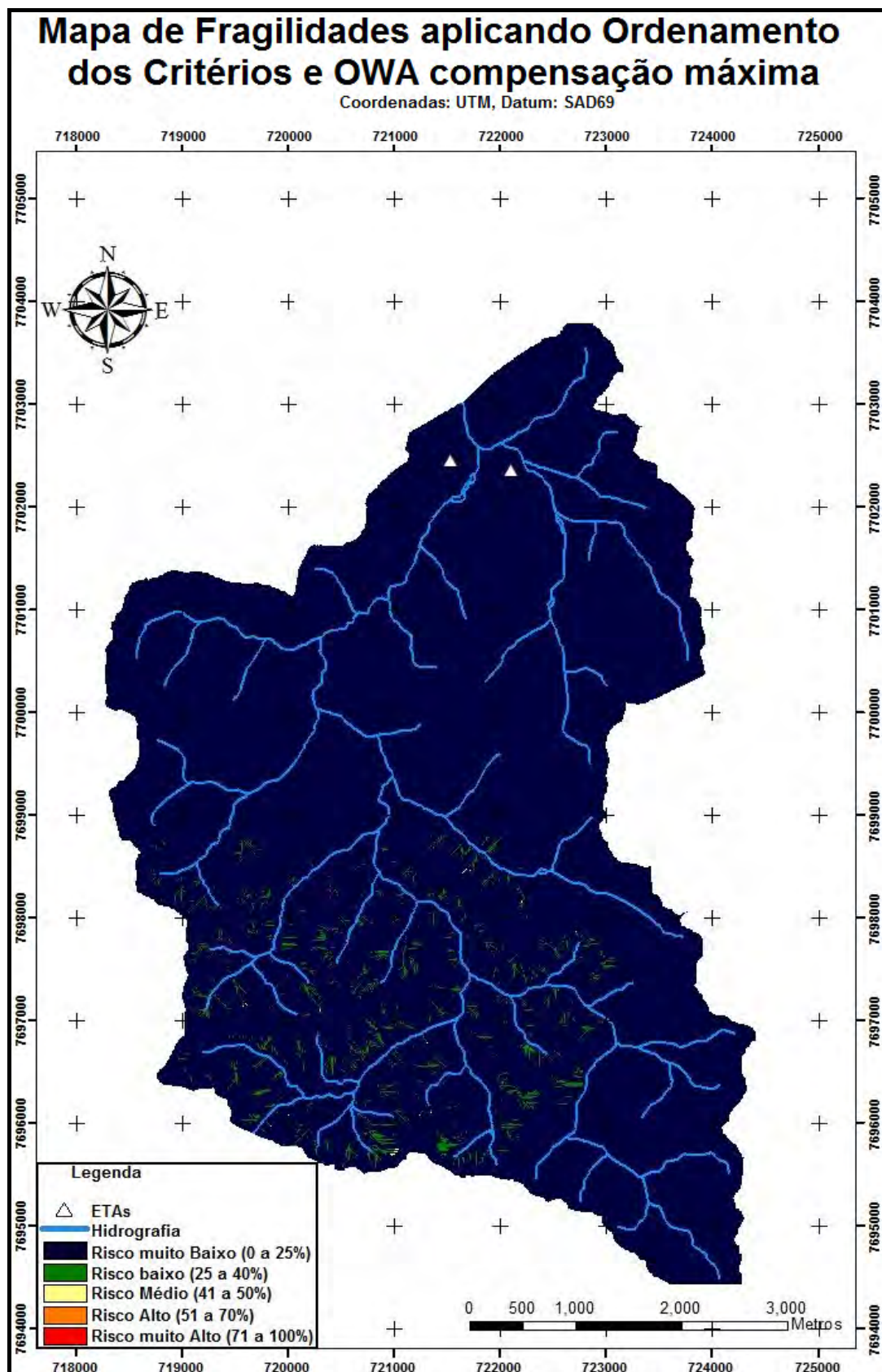


Figura 34. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método de Ordenamento dos Critérios para geração dos pesos e do método OWA considerando máxima compensação dos riscos para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

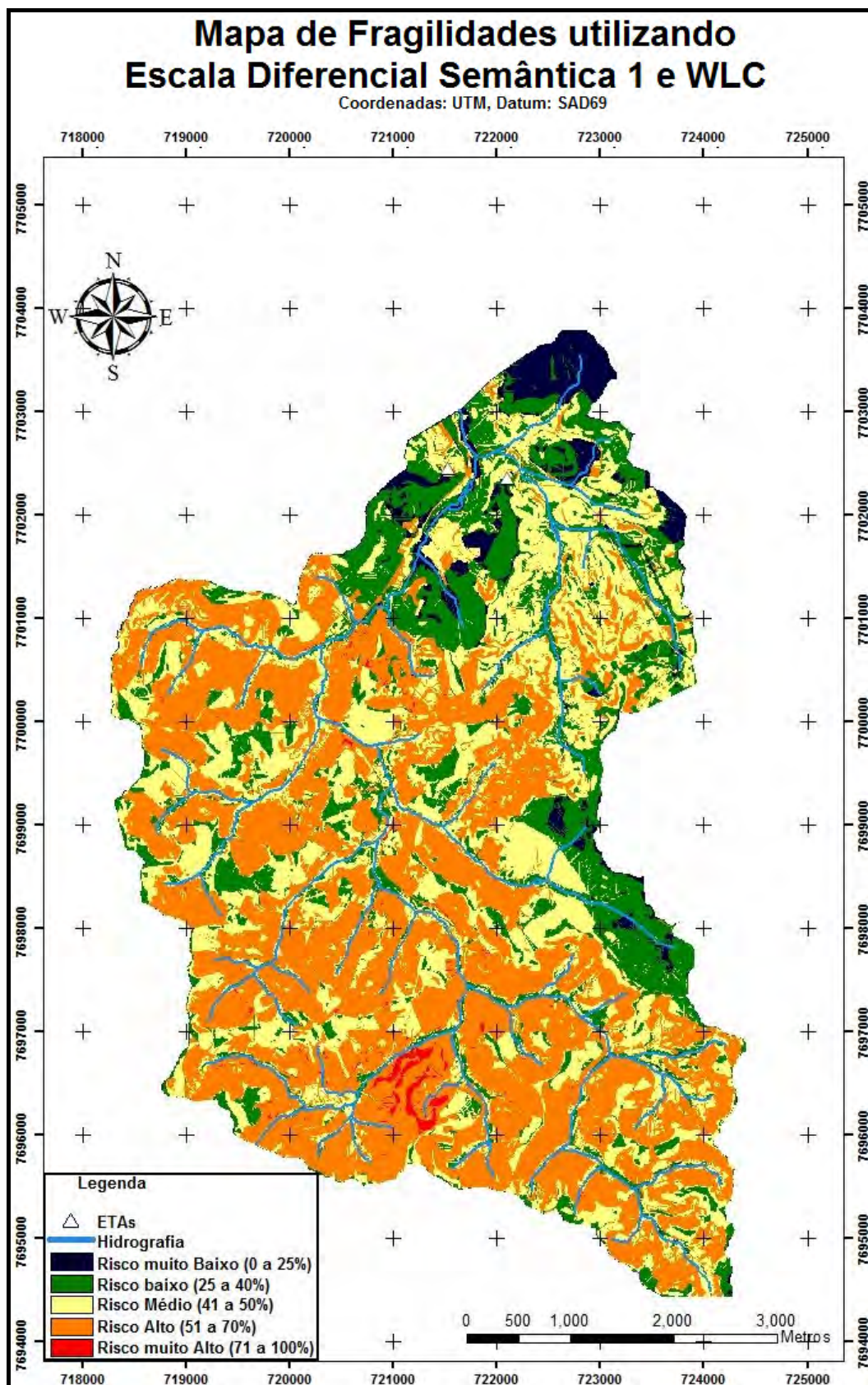


Figura 35. Mapa de fragilidade gerados com o emprego do Método da Escala Diferencial Semântica 1 para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

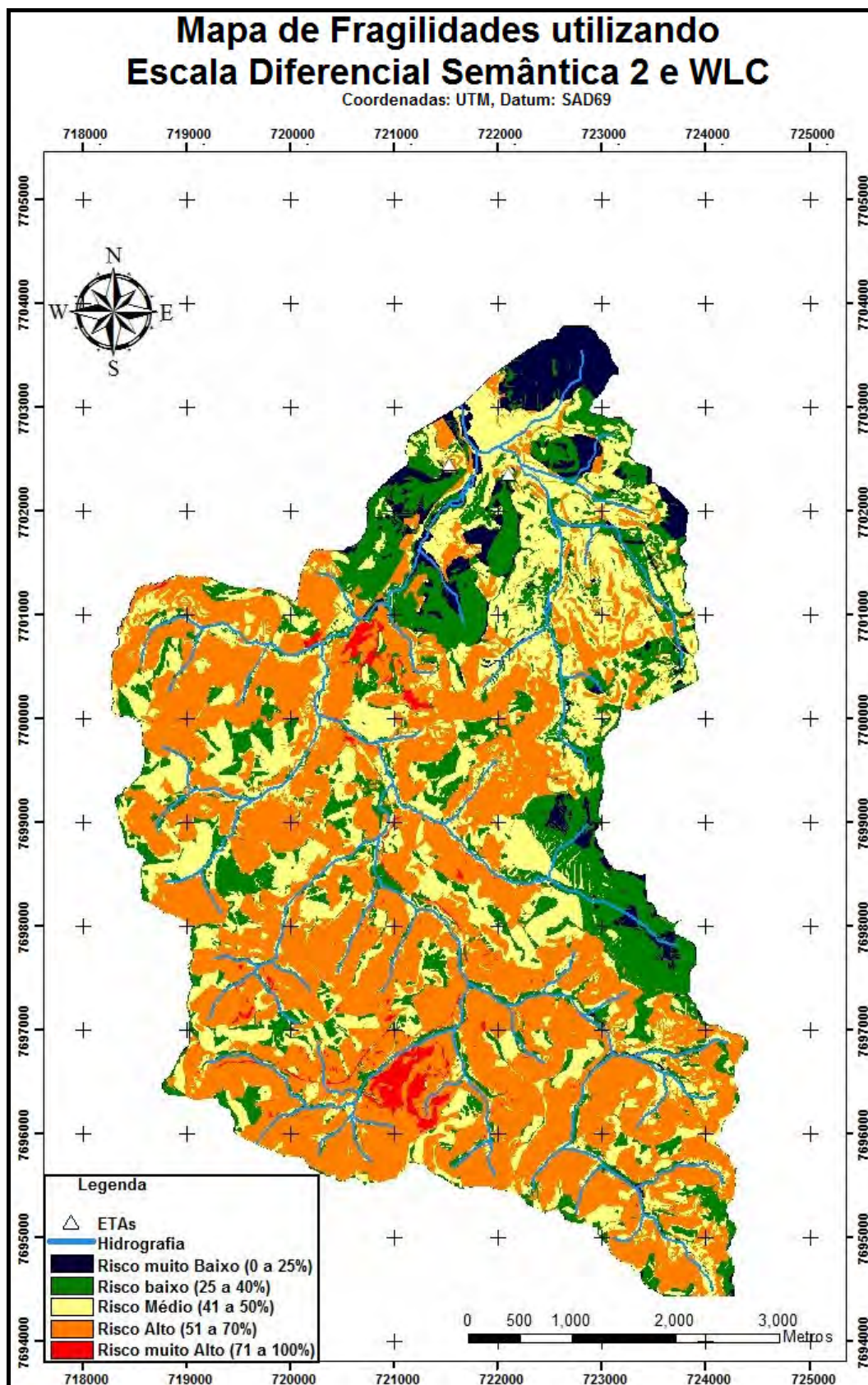


Figura 36. Mapa de fragilidade gerados com o emprego do Método da Escala Diferencial Semântica 2 para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

Entre a primeira e a segunda forma de aplicação desse método de ponderação, ficam evidentes as seguintes diferenças no que tange às áreas de grau de perigo mais elevado: (i) a primeira forma de aplicação (que deixou os pesos um pouco mais homogêneos) gerou uma pequena concentração na área sul e outros pontos dispersos ao longo da bacia (Figura 35); (ii) a segunda aplicação (que enfatizou mais a camada de uso e ocupação) gerou um foco maior na área ao sul da bacia acompanhado também de focos pequenos espalhados, mas mais concentrados que com a aplicação anterior (Figura 36).

Porém, independente dessa pequena variação na ênfase da área de riscos, ambas aplicações produziram resultados muito similares.

A Figura 37 apresenta o mapa de fragilidades gerado com emprego do método de ponderação da Análise Hierárquica 1 (MAH - 1), considerando os 10 mapas de fontes de poluição como critérios de posição 2 no ranking, e do método de combinação dos critérios WLC.

Como esperado, esse método supervalorizou (aproximadamente 77% do peso total) informações que possuíam redundância, ou seja, os mapas contendo as distâncias das fontes de poluição. Devido à proximidade entre os diferentes pontos de poluição coletados e aos pesos muito próximos entre os 14 critérios, o resultado saturou a região de concentração de fontes de poluição (área central e sul da bacia). Além disso, a área norte da bacia foi descrita como de grau de perigo baixo ou muito baixo (declínio notável do grau de perigo em relação aos outros mapas de fragilidade gerados pela técnica WLC).

A Figura 38 apresenta o mapa de fragilidades gerado com o método de ponderação da Análise Hierárquica 2 (MAH - 2), considerando os 10 mapas de fontes de poluição como um critério de posição 2 no ranking, e o peso obtido dessa maneira dividido posteriormente entre as 10 fontes; além do método de combinação dos critérios WLC.

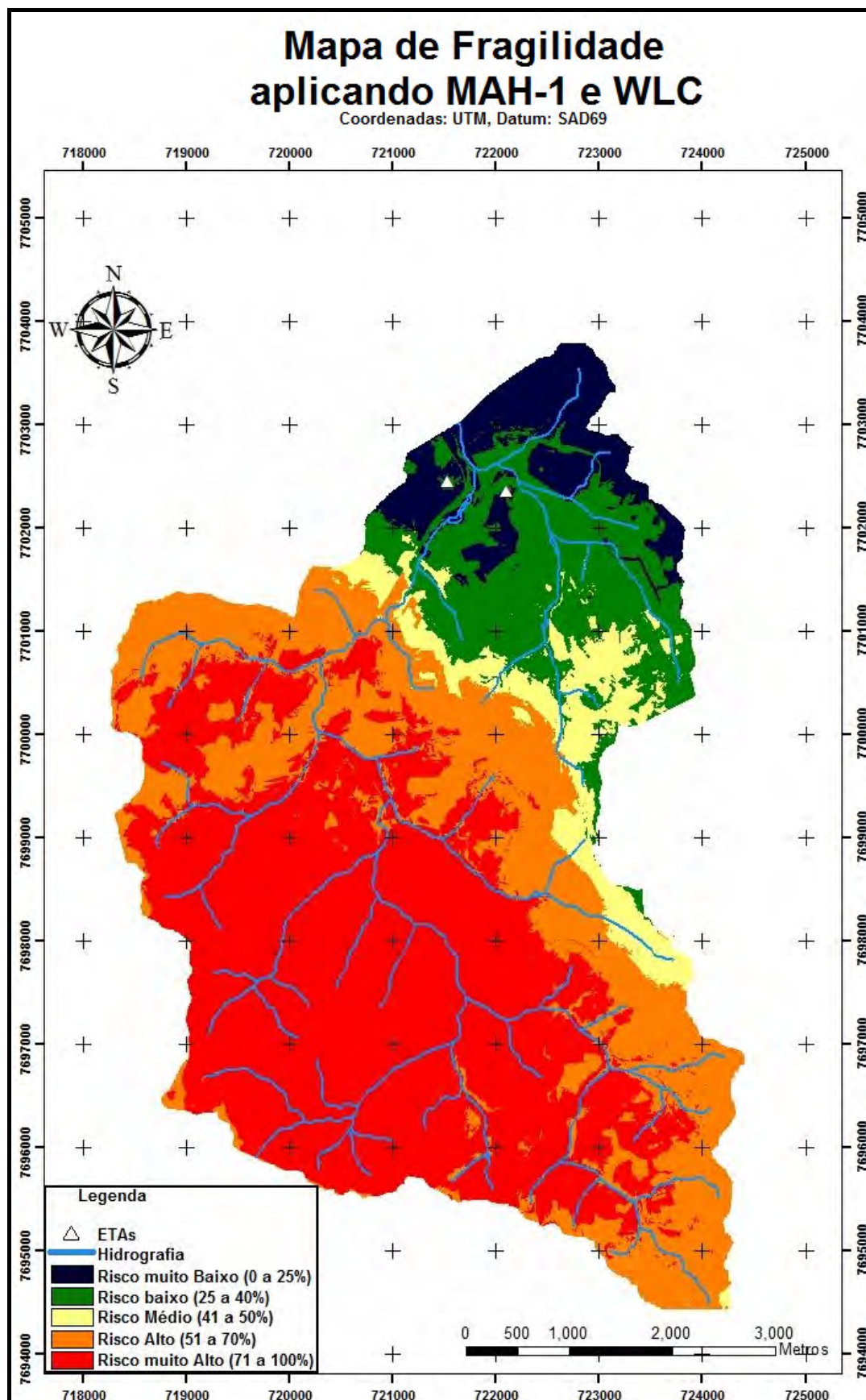


Figura 37. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método da Análise Hierárquica (MAH) 1 para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

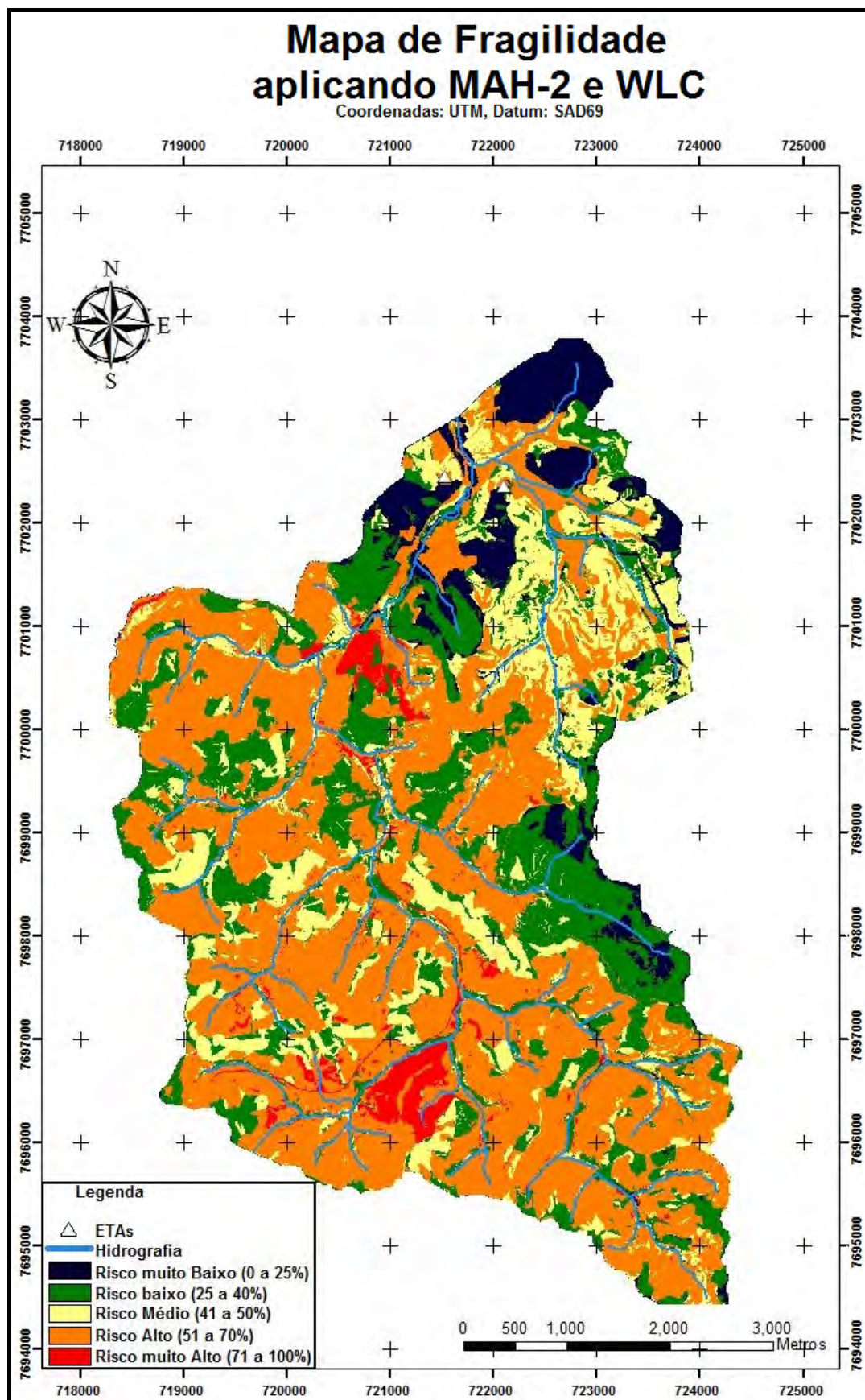


Figura 38. Mapa de fragilidades gerados com o emprego do Método da Análise Hierárquica (MAH) 2 para geração dos pesos e do método WLC para combinação dos critérios, bacia de captação do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, 2009.

É possível observar que este método de ponderação realçou os perigos de forma mais evidente que os demais métodos que utilizam o método de combinação WLC. Ao invés de apenas um foco mais denso e nítido de grau de risco elevado, foram gerados dois focos, além de pequenas outras áreas em suas proximidades. Porém, esse resultado não é muito discrepante dos demais métodos com a combinação WLC, exceto em relação ao MAH – 1, o qual, como já destacado, se diferenciou de todos os demais.

Em síntese e em linhas gerais, os métodos WLC de combinação dos critérios geraram resultados muito próximos, com exceção do MAH – 1.

É importante ressaltar que os mapas gerados com os métodos WLC (à exceção do métodos MAH–1) evidenciaram, com maior ou menor intensidade, áreas coincidentes de perigos máximos (em vermelho nos quatro mapas). Nesses focos de perigos máximos, que correspondem a aproximadamente 3% da área total da bacia (se considerado o mapa de fragilidades gerado por MAH-2 para este cálculo), há principalmente solo exposto e áreas urbanizadas, além de grande concentração de criadouros animais em seu entorno, que são fontes potenciais de poluição. Ou seja, esses mapas mostram-se consistentes com o uso e ocupação da terra e com as atividades predominantes na bacia.

4.5. Mapas dos índices de qualidade da água

A Figura 39 apresenta o mapa dos IQA médios dos doze meses de monitoramento obtidos por sub-bacia, com seus respectivos valores, já classificados e representados de acordo com as classes e cores padronizadas (Tabela 1).

A Figura 40 apresenta o mapa dos IAP médios dos nove meses de monitoramento obtidos por sub-bacia, com seus respectivos valores, já classificados e representados de acordo com as cores e classes padronizadas (Tabela 1).

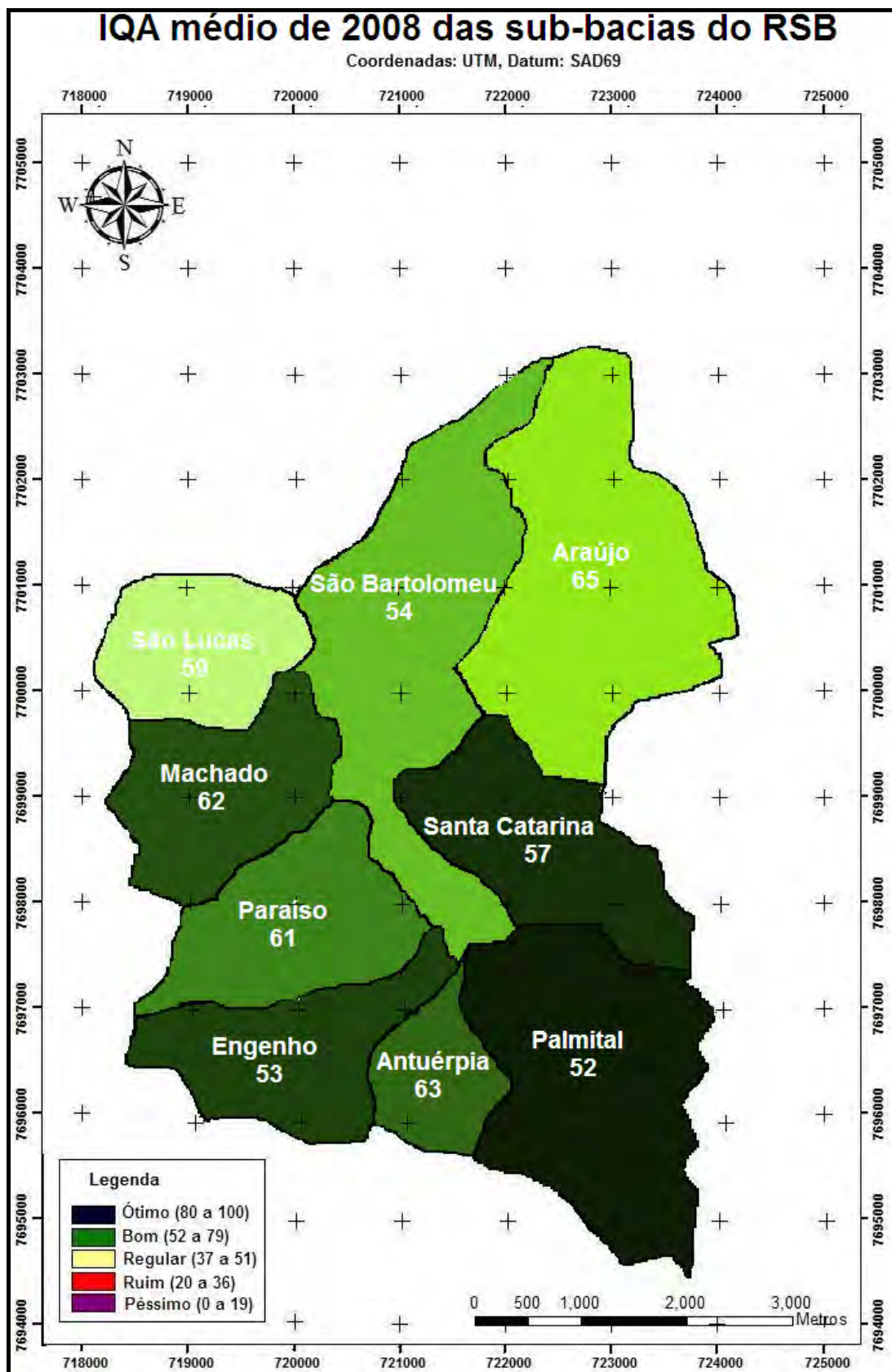


Figura 39. Índices médios de qualidade da água (IQA) para as sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, fevereiro a outubro de 2008.

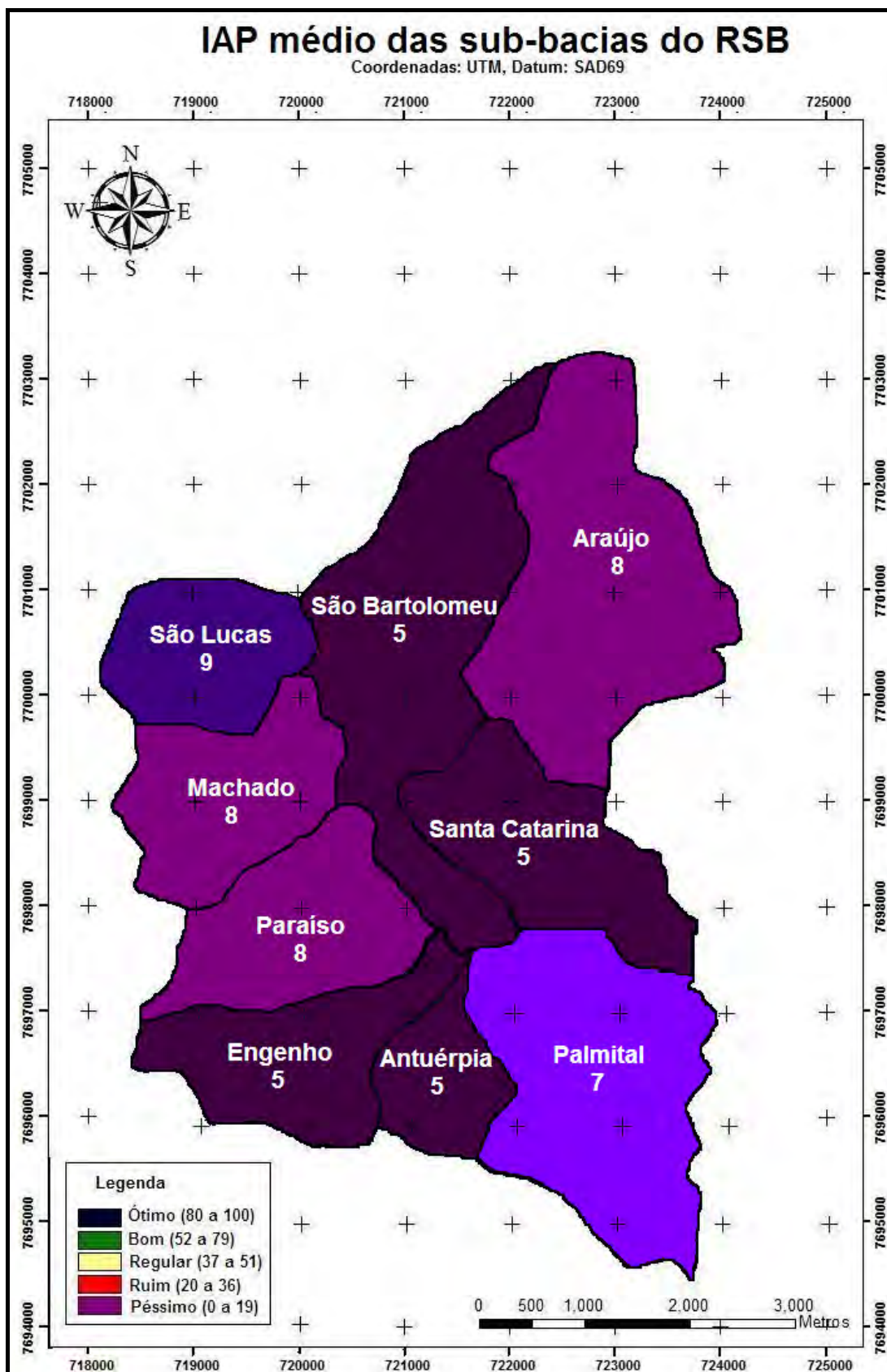


Figura 40. Índices médios de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público (IAP) para as sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, fevereiro a outubro de 2008.

Ao se analisar comparativamente os dois índices notam-se diferenças evidentes: no processo classificatório o IQA médio de todas as sub-bacias foi tido como bom (52 a 79), enquanto o IAP médio como péssimo (0 a 19). Porém, o IAP é uma combinação entre o IQA e o ISTO, evidenciando que ‘as notas baixas’ para a qualidade da água se devem ao índice ISTO, mais especificamente a alta concentração de Cadmo (metal pesado) na bacia.

Consequentemente, a ponderação das camadas de informação pode fazer com que os mapas de fragilidade tendam a um desses índices, dependendo das concentrações das diversas substâncias presentes na água, tenderá ao IQA quando as ST e, ou as SO forem subestimadas, e ao IAP quando forem superestimadas e/ou estimadas corretamente.

Ainda é válido lembrar a importância relativa e específica de cada um desses índices: o IQA expressa a tratabilidade da água (ou seja, factibilidade do emprego do tratamento convencional para a potabilização da água em função da qualidade da água bruta); o IAP reflete algo similar, mas levando em consideração explicitamente valores de norma para substâncias tóxicas (ST) e para substâncias que alteram as características organolépticas da água (SO). Ou seja, o IAP, pode ser entendido como um índice mais fidedigno que o IQA para expressar a tratabilidade de água, do ponto de vista de atendimento ao padrão de potabilidade, incluindo seus aspectos de proteção à saúde e de aceitação para consumo (aspectos organolépticos) (CETESB, 2007).

4.6. Validação dos mapas de fragilidade

Durante a validação dos mapas de fragilidade gerados, comparando-os aos mapas de índices de qualidade da água, ficou evidente que os mapas dos índices de qualidade se tornaram muito homogêneos (devido à espacialização por sub-bacias), enquanto os mapas de fragilidade possuem distribuição heterogênea dentro de cada sub-bacia, devido às diversas formas geométricas encontradas nos critérios para descrever as diferentes classes que os compõe.

Contudo, isso não implica erro, apenas em diferentes graus de detalhamento, enquanto os mapas de índices possuem apenas uma classificação por sub-bacia, os

mapas de fragilidade possuem diferentes graus de perigos inseridos em cada sub-bacia.

4.6.1 Relativa ao método de Combinação dos critérios

Ao se analisar o método de combinação dos critérios chega-se a conclusão de que o OWA com risco máximo se aproxima muito do mapa do índice IAP, uma vez que ambos saturam a imagem para os piores valores (perigos x qualidade da água).

Porém, se a bacia não apresentasse problemas relacionados à presença de substâncias tóxicas e, ou de substâncias que alteram as características organolépticas da água, o resultado deste método de combinação dos critérios seria o mesmo, ou seja, alto grau de perigo para toda a bacia; conseqüentemente, a validação falharia, e ao método OWA poderiam ser imputadas superestimativas de perigos.

O método OWA com compensação máxima, ou seja, risco mínimo, não se aproximou de nenhum dos dois índices, ficando evidente seu potencial de minimização dos perigos na bacia.

Em resumo, ambos os métodos OWA parecem resultar em avaliações por demais extremas, não se mostrando apropriados para acomodar situações e aplicações genéricas.

O método WLC parece fornecer resultados mais promissores, uma vez que gerou informações próximas às do IQA. Especula-se que isso possa ter ocorrido devido ao método WLC ser um método conservador e trabalhar sempre próximo à média e, também, aos fatos de que (i) durante o processo de homogeneização dos critérios uma parte mínima das classes foi considerada de risco máximo, ou (ii) as classes as quais foi atribuído risco máximo respondem por pequeno percentual da área total da bacia.

Resumidamente ao se analisar os resultados obtidos com os mapas de fragilidade focando os métodos de combinação dos critérios, e comparando-os com os resultados dos índices de qualidade da água, pode-se concluir que (Tabela 17):

Tabela 17. Comparação dos mapas gerados com os diferentes métodos de combinação de critérios e os mapas de índices de qualidade da água .

Método de Combinação	Resultados	Comparação com os índices
OWA risco máximo	Saturação da imagem para o risco máximo	IAP-resultados próximos, por coincidência
		IQA - resultados discrepantes
OWA compensação máxima	Saturação da imagem para os valores mínimos	IAP-resultados muito discrepantes
		IQA - resultados discrepantes
WLC	Valores homogêneos em torno de 50e 60% de risco	IAP - resultados discrepantes, exceto pelo método de ponderação MAH-1
		IQA - resultados coerentes, exceto o MAH-1

As seguintes observações a respeito do método de combinação merecem ainda destaque:

(i) No presente estudo o mapa gerado com o método OWA com risco máximo mostrou boa aderência ao mapa do índice IAP, ou seja, o método mostrou-se com potencial para retratar adequadamente situações de perigo elevado. Observe-se que o critério de cálculo do IAP exatamente retrata situações também extremas, ao selecionar os dois valores mínimos mais críticos do grupo de variáveis que indicam a presença de substâncias tóxicas na água (ver equação 4).

(ii) Ainda no presente estudo, o mapa de fragilidades gerado com o método OWA com compensação máxima não se aproximou dos mapas de nenhum dos dois índices, ficando evidente seu potencial de minimização dos perigos associados à bacia.

(iii) Entretanto, os dois métodos OWA parecem resultar em avaliações por demais extremas, não se mostrando apropriados para acomodar situações e aplicações genéricas.

(iv) No presente estudo, o método WLC apresentou resultados mais similares com o IQA, sendo considerado o método mais promissor para este fim.

(v) Os mapas gerados com os métodos WLC (à exceção do método MAH-1) evidenciaram áreas coincidentes de perigos máximos e consistentes com informações de uso e ocupação da terra na bacia.

4.6.1 Relativa ao método de Ponderação dos critérios

Devido à similaridade entre os mapas de fragilidade obtidos pelo método de combinação dos critérios WLC, considerando os diferentes métodos de ponderação,

optou-se por gerar a área percentual de cada uma das classes, assim como a média e o desvio padrão das células (Tabela 18), de forma a facilitar interpretações.

Tabela 18. Percentual da distribuição entre as classes de perigo para cada método de ponderação.

Método de Ponderação	Área em percentual para cada Grau de Risco					média	desvio padrão
	0-25	26-40	41-50	51-70	70-100		
Ordenamento de Critérios	4.89%	18.30%	26.28%	48.41%	2.13%	48.108	11.449
Escala Diferencial Semântica 1	4.09%	19.32%	30.10%	45.86%	0.62%	48.360	12.333
Escala Diferencial Semântica 2	4.85%	20.02%	26.98%	46.78%	1.36%	49.239	12.747
MAH - 1	6.68%	12.39%	6.40%	27.13%	47.40%	62.842	20.246
MAH - 2	7.30%	22.67%	16.98%	50.03%	3.03%	48.505	14.180

Como pode ser observado entre as estatísticas dos mapas, MAH-1 confirma-se com uma exceção dentre os demais, o que pode ser devido a: (i) os pesos elevados atribuídos às informações redundantes (fontes de poluição); (ii) esses pesos poderem ser considerados os mais adequados dentre todos, por retratarem de forma mais direta a questão das substâncias tóxicas e, ou organolépticas; inclusive por esse motivo, esse foi o único mapa de fragilidades gerado com metodologia WLC que se aproximou do IAP.

Por conseguinte, foi utilizada a média e o desvio padrão dos IQAs, uma vez que os mapas de fragilidade utilizando WLC se aproximaram dele, levando em consideração o número de pixels atribuídos a cada sub-bacia, ou seja, sub-bacias maiores tiveram pesos maiores nesse cálculo, chegando a uma média de **58,141** e um desvio padrão de **4,757**. Com isso, chega-se a um intervalo de valores médio variando de **53** a **63**.

A partir desse intervalo médio, pode-se concluir que o método de ponderação que locar maior número de pixels nesse intervalo, tem maior probabilidade de retratar mais fielmente o IQA, porém isso ainda é insuficiente para poder considerar o método como mais apropriado para este fim. Para efeito de tal exercício, foi calculado o intervalo médio de cada método (onde o valor mínimo do intervalo será igual à média menos o desvio padrão e o valor máximo igual à média mais o desvio padrão), além de se calcular o percentual de pixels que foram locados fora do intervalo médio do IQA (Tabela 19).

Tabela 19. Intervalo médio de cada método e percentual de pixels classificados fora do intervalo médio de IQA.

Método de Ponderação	Estatísticas				Percentual de <i>pixels</i> fora do intervalo médio do IQA
	Média	Desvio padrão	Min	Max	
Ordenamento de Critérios	48.108	11.449	37	60	51.60%
Escala Diferencial Semântica 1	48.36	12.333	36	61	54.13%
Escala Diferencial Semântica 2	49.239	12.747	36	62	53.21%
MAH - 2	48.505	14.18	34	63	49.98%

Pela Tabela 19, nota-se que, sob as condições pré-estabelecidas, o método de ponderação MAH-2 apresentou valores mais centrados em torno da média de IQA, possuindo maior probabilidade de representar o IQA mais fielmente. Porém, nota-se também que as diferenças em relação aos demais métodos são pequenas, e que estes são de mais simples implementação e execução.

4.7. Avanços em relação a trabalhos anteriores

Portes (2008) executou metodologia similar a esta para a bacia do RSB, porém o estudo atual apresentou progressos em relação a Portes (2008) em diversos aspectos: (i) fontes de poluição foram consideradas na base de dados que compõe a análise multicritério; (ii) foi empregada a ferramenta *Decision Wizard* do software Idrisi Andes no processo de geração dos mapas de fragilidade, que proporciona maior controle e número de opções ao usuário, além de ser uma ferramenta de pronta utilização e de mais rápido processamento; (iii) índices de qualidade da água (IAP e IQA) foram espacializados com a finalidade de validar os mapas de fragilidade gerados; (iv) foram empregados e testados diferentes métodos de ponderação das camadas de informação; (v) foram utilizados e testados diferentes métodos de combinação dos critérios (OWA risco máximo, OWA compensação máxima e WLC).

4.8. Dificuldades Encontradas

Finalmente, é importante salientar algumas das dificuldades encontradas na execução desta metodologia, tais como:

(i) Baixo retorno dos especialistas a respeito do questionário, que dificulta a execução adequada do método Delphi de consulta;

(ii) Dificuldades e grande dispêndio de tempo na elaboração dos questionários do método Delphi, uma vez que há necessidade de uma equipe multidisciplinar e o questionário não pode ser tendencioso a ponto de induzir resultados;

(iii) Necessidade de utilização de diferentes softwares, fator que encarece o produto final e torna o processo mais demorado.

5. CONCLUSÕES

Inicialmente é importante salientar que se consideram cumpridos os objetivos centrais do trabalho: a metodologia aqui explorada (utilização da análise multicritério empregada sobre diferentes camadas de informação que compõe o cenário real através de um SIG), se mostrou adequada para gerar mapas de fragilidade em bacias de captação, tendo em vista a tratabilidade e o abastecimento de água para consumo humano.

Em se tratando da espacialização dos índices de qualidade da água (IAP e IQA), pode-se dizer que a forma encontrada foi a mais adequada possível tendo em vista a forma de obtenção dos dados, com base em amostragem da água em pontos representativos de toda a área de drenagem das sub-bacias. Porém esta forma de representação é muito genérica, gerando mapas de qualidade da água muito homogêneos e, conseqüentemente, divergindo parcialmente dos resultados encontrados na análise multicritérios, a qual, por sua vez gerou mapas mais heterogêneos e com diferentes graus de perigo dentro de cada sub-bacia. É preciso também registrar que os critérios de ponderação e cálculo dos índices de qualidade da água, acabaram também por gerar valores bem próximos para cada índice em todas as sub-bacias, mais uma vez agregando discrepâncias em relação à maior heterogeneidade registrada nos mapas de fragilidade.

A divergência entre os resultados proporcionados pelos dois índices de qualidade da água (IAP e IQA) (novamente, devido aos respectivos critérios de cálculo), também acrescenta dificuldades de comparação com os mapas de fragilidades. Ou seja, dependendo das concentrações das substâncias presentes, a ponderação das camadas de informação pode fazer com que os mapas de fragilidade tenham melhor aderência aos mapas relativos a um ou outro desses dois índices.

Conclui-se que a proposta metodológica traçada mostrou-se promissora, mas, de forma a aprofundar a discussão comparativa entre os métodos de ponderação testados ainda deve ser testada e analisada em situações diversas, tais como: outras

bacias, banco de dados de qualidade da água mais amplos (quali-quantitativamente), inserção de outras variáveis (critérios), por exemplo, precipitação pluviométrica, consulta Delphi mais ampla e diversa.

Adicionalmente, sugere-se para trabalhos futuros a implementação e utilização do método MacBeth para ponderação e sua confrontação com os demais métodos, de modo a avaliar sua eficiência e aplicabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A.T. e COSTA, A.P.C. S. Aplicações com métodos multicritério de apoio à decisão. Série: **Pesquisa Operacional**, v.25, n2, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 21/10/2008.
- ARÊDES, M.N.; COELHO, K.B.P. **Uso do solo e implicações ambientais em áreas urbanas: Um estudo de caso**. Apud: MOURA, A.M.S.; SENA FILHO, N. Cidades: relações de poder e cultura. Goiânia: Ed. Vieira, 2005. 334p.
- ARRUDA, P. R. R. **Uma contribuição ao estudo ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa, Minas Gerais**. Viçosa, 1997, p. 108. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG, 1997.
- BASTOS, R.K.X.; HELLER, L.; FORMAGGIA, D.M.E.; AMORIM, L C; SANCHEZ, P S.; BEVILACQUA, P.D.; COSTA, S. S.; CÂNCIO J. A. Revisão da Portaria 36 GM/90. Premissas e princípios norteadores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL,21, João Pessoa, 2001. **Anais**: Rio de Janeiro:ABES, 2001 (CD room)
- BASTOS R. K. X.; MOUNTEER, A. H, NASCIMENTO, L. E. **Qualidade da Água**. Aulas teóricas, parte II. Viçosa-MG: [s.n], 2003 (notas de aulas) Disponível em: <<https://www2.cead.ufv.br/sistemas/pvanet/files/conteudo1005/apostilaaulasteoricasParte2atualizada.doc>>.
- BASTOS, R.K.X.; MARQUES, M. O. Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura. Uma análise crítica. In: BASTOS, R.K.X. (Coord). **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura**. Rio de Janeiro: ABES, 2003, p. 247-353. (Projeto Prosab)
- BASTOS R.K.X; HELLER, L.; PRINCE. A.A.; BRANDÃO, C.C.S.; COSTA, S.S.; BEVILACQUA, P.D.; ALVES, R.M.S. **Boas práticas no abastecimento de água: Procedimentos para a minimização de riscos à saúde** Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 260 p. (Série A. Normas e Manuais Técnicos).

- BASTOS, R.K.X.; BEZERRA, N.R.; BEVILACQUA, P.D. Planos de segurança da água: novos paradigmas em controle de qualidade da água para consumo humano em nítida consonância com a Legislação Brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, Belo Horizonte, 2007. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2007 (CD room)
- BASTOS, R.K.X. (Coord.). **Plano de Segurança da Água**. Viçosa-MG: [s.n], 2009 (relatório final) (no prelo).
- BASTOS, R.K.X.; BEVILACQUA, P.D; MIERZWA, J.C. Análise de risco aplicada ao abastecimento de água para consumo humano. In: PÁDUA V.L. (Coord.) **Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2009, p. 327-360. (Projeto Prosab)
- BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F.; **Conservação do solo**. Piracicaba: Ed: Livrocercos, 1985. 392 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Coordenação Geral em Saúde Ambiental. **Portaria MS n.º518/2004** – Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2004.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama 357. Brasília: Ministérios do Meio Ambiente, 2005.
- BUSCHINELLI, C.C.A.; SILVA, A.S.; RODRIGUES, I.A.; MACHADO, R.E. Índice de Sustentabilidade ambiental do uso da água (ISA_ÁGUA): municípios da região do entorno do Rio Poxim, SE. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento EMBRAPA** (Jaguariúna), n 22, p 17-26, 2004.
- CALIJURI, M. C. A comunidade fitoplânctônica em um reservatório tropical (Barra Bonita, SP). São Carlos, 1999, 211p. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 1999.
- CALIJURI, M.L.; MELO, A.L.O.; LORENTZ, J.F. Identificação de áreas para implantação de Aterros Sanitários com o uso de análise estratégica de decisão. **Informática Pública**, v.4, n.2, p. 231-250. 2002.
- CARDOSO, L.R.A.; ABIKO, A.K.; HAGA, H.C.R.; INOUE, K.P.; GONÇALVES, O.M. Prospecção de futuro e método Delphi: Uma aplicação para a cadeia produtiva da construção habitacional. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 3, p. 63-38. 2005.
- CASTRO, P.S. Interceptação da chuva por mata natural secundária na região de Viçosa-MG. **Revista Árvore**, v.7, n.1, p. 76-89. 1983.

- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo. Índices de qualidade das águas** (Série relatórios, Anexo III). São Paulo: Cetesb, 2007. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/publicacoes.asp> > Acesso em: 15/04/2009.
- CORRÊA, G.F. Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do Planalto de Viçosa, MG. Viçosa, 1984, 169p. Dissertação (Mestrado em Solos) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 1984.
- COSTA, L.A. Proposta de Zoneamento de áreas rurais utilizando Sistemas de Informações Geográfica. Viçosa, 2001, 368p. Dissertação (Doutorado em Solos) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2001.
- COSTA, C.A.B; VANSNICK, J. C. Applications of the Macbeth approach in the framework of an additive aggregation model. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v.6, n.1, p.107-114, 1997.
- DIAS, G. M. F. Estudo integrado da qualidade de água da bacia do São Bartolomeu: análise epidemiológica, ambiental e espacial. Viçosa, 2007, 189p. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) – Departamento de Veterinária, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2007.
- DONZELI, P.L.; VALERIANO, M.M.; LOMBARDI NETO, F.; NOGUEIRA, F.P.; PINTO, S.A.F.; VALÉRIO FILHO, M.; STEIN, D.P. Diagnóstico de Erosão e plano de manejo de bacias hidrográficas utilizando Geoprocessamento e Modelos de Previsão: Evolução da Metodologia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, Salvador, 1996. **Anais...** INPE, p. 145-146.
- DORCAL, C.C.; LUVIZOTTO JR, E.; ANDRADE, J.G.P. **Aspectos da implantação de um SIG em pequenos e médios abastecimentos de água.** (Série água e tecnologia). Disponível em: <www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/trabalhos/A06_19.pdf> Acesso em: 07/07/2008.
- EASTMAN, J.R., JIN, W., KYEM, P.A.K., TOLEDANO, J. Raster procedures for multi-criteria, multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.61, n.5, p.539-547, 1995.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. **Cultivo de Algodão.** (Série: Sistemas de Produção, 3). Campinas: EMBRAPA, 2003. Disponível em: < <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoIrrigado/solos.htm> > Acesso em: 10/06/2008.

- FARIAS, M.S.S. Monitoramento da Qualidade da Água na Bacia do Rio Cabelo. Campina Grande, 2006, 178p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2006.
- FATURETO, C.R.C.; SANTOS, H.N. Otimização na agricultura: uma abordagem sob critérios múltiplos. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA RURAL, 30, Natal, 1997. **Anais...** Natal:CSBER, 1997. (CD rom p. 695-709).
- FERRAZ, S.F.B.; MARSON, J.C.; FONTANA, C.R.; LIMA, W.P. Uso de indicadores hidrológicos para classificação de trechos de estradas florestais quanto ao escoamento superficial. **Scientia Forestalis**, n. 75, p. 39-49, 2007.
- FONSECA NETO, F.D.; BRAGA, A.L.; OLIVEIRA, A.M.S.; OLIVEIRA, J.C. Uso dos Sistemas de Informações Geográficas na determinação das características físicas de uma bacia Hidrográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: SBSR, 2007 (CD rom p. 2581-2588).
- GOMES, L. F. M. A; GOMES, C. F. S; ALMEIDA, A. T. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério.** São Paulo: Ed. Atlas, 2009. 326p.
- GRISI, C.C.H. e BRITTO, R.P. Técnica de cenários e o método Delphi: uma aplicação para o ambiente brasileiro. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO, 4, São Paulo, 2003. **Anais...** SEMEAD: 2003 (CD rom).
- HELMANN, K.S.& MARÇAL, R.F.M. Método Multicritério de apoio à decisão na gestão da manutenção: aplicação do método Electre I na seleção de equipamentos críticos para processo. **Revista Gestão Industrial**, v.3, n.1, p. 123-134, 2007.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Noções básicas de cartografia.** (Série Geociências/Cartografia) São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoas/aplicacoes_uso.html>. Acesso em: 22/08/2008.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Apostila do curso – SPRING 3.4 (versão windows).** (Série: Manuais) São José dos Campos, 2000. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>> Acesso em: 12/12/2008.

- JANNUZZI, P.M. **Construção de Indicadores e mapas de pobreza e riqueza nos municípios brasileiros**. Brasília, 2005. Disponível em: <http://vsites.unb.br/ie/est/noticias/unb-ind-amd3.pdf>, Acesso em: 25/09/2008.
- JONG, J.; ROOY, P.T.J.C.; HOSPER, S.H. Living with water: at the crossroads of change. **Water Science Technology**. Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, The Netherlands, n.08, p. 393-400, 1995.
- KAWAKUBO, F.S.; MORATO, R.G.; CAMPOS, K.C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J.L.S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia, 2005. **Anais**: São José dos Campos: XII SBSR: 2005 (CD rom p. 2203-2210).
- MARINS, C. S. e COZENDEY, M. I. A metodologia de multicritério como ferramenta para tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25, Porto Alegre, 2005. **ANAIS**: Porto Alegre: ENEGEP, 2005 (CD rom).
- MENDES, C.A.B. e CIRILO, J.A. **Geoprocessamento em recursos hídricos, integração e aplicação**. Porto Alegre: Ed: ABRH, 2001. 248p.
- MOURA, A.N.M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em análise de multicritérios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, 2007. **Anais**: São José dos Campos: SBSR, 2007 (CD rom p. 2899-2906).
- OSGOOD, C.E.; SUCI, G.J.; TANNEMBAUM, P.H. **The measurement of meaning**. Chicago -USA: Ed: University of Illinois Press. Chicago, 1957. 339p.
- PIOLA, S.F.; VIANNA, S.M.; VIVAS-CONSUELO, D. Estudo Delphi: atores sociais e tendências do sistema de saúde brasileiro. **Caderno de Saúde Pública do Rio de Janeiro**, n.18, p.181-190, 2002.
- PIVELLO, V.R.; BITENCOURT, M.D.; MANTOVANI, W; MESQUITA JÚNIOR, H.N.; BATALHA, M.A.; SHIDA, C.N. Proposta de zoneamento ecológico para a reserva de Cerrado Pé-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP). **Brazilian Journal of Ecology**. v.02, n.02, p-23-29, 1998.

- POLETO, L.J.C.; SILVA, C.H.C.; RIBEIRO JÚNIOR, S.; VIEIRA, C.A.O. Validação de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO, 2, Recife, 2008. **Anais:** Recife: SIMGEO, 2008 (CD rom p.1036-1042)
- PORTES, R.C. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG Através de Geoprocessamento e Análise Multicritério. Viçosa, 2008, 68p. Dissertação (Graduação em Geografia) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2008.
- QUEEN, L.P.; BLINN, C.R.; **The basics os Geographic Information Systems.** Minnesota – USA, 1993. Disponível em: < <http://www.extension.umn.edu/distribution/naturalresources/dd5926.html>>, Acesso em: 13/08/2008.
- RAMOS, R.A.R. Localização industrial – um modelo espacial para o noroeste de Portugal. Braga – Portugal, 2000, 405p. Dissertação (Doutorado em Ciências do Espaço), Universidade do Minho-Portugal 2000.
- SAATY, T.L. A Scaling method for priorities in hierarquical structures. **J. Math. Psychology**, n.15, p.234-281, 1977.
- SANTOS, I. e VITTE, A.C. Proposta de mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Palmital, região metropolitana de Curitiba. In: FÓRUM GEO-BIO-HIDROLOGIA: ESTUDOS EM VERTENTES E SUB-BACIAS, 1, Curitiba, 1998. **Anais...**Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1998 (CD rom).
- SEMA - Secretaria Especial do Meio Ambiente. **Caracterização e Diretrizes Gerais de Uso da Área de Proteção Ambiental do Rio São Bartolomeu (escala 1:100.000).** (Série: Áreas de Proteção Ambiental). Disponível em: < http://eco.ib.usp.br/lepac/conservacao/Artigos/83_zoneamento_eco.pdf Acesso em: 06/01/2009.
- SILVA, A.M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas.** São Carlos: Ed. UFLA, 2003. 138p.
- SILVA, C.H.C.; POLETO, L.C.; VILELA, T.A.; VIEIRA, C.A.O. Determinação de áreas de risco e simulação de intervenções através do uso de SIG na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, 2009. **Anais...** São José dos Campos: SBSR, 2009 (CD rom p.5443-5449).

- SILVA, J.F. e RODRIGUES, S.C. **Síntese Ambiental e Evolução do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Córrego do Salto, Uberlândia (MG)**. (Série: Caminhos da Geografia – revista on-line) Uberlândia, 2004. Disponível em: < <http://www.caminhosdegeografia.ig.ufu.br/include/getdoc.php?id=350&article=103&mode=pdf>>, Acesso em: 21/10/2008.
- SILVA, P.A; BANA E COSTA,C; CORREIA, F.N. **Avaliação multicritério das incidências ambientais de medidas de controlo de cheias: O caso da Ribeira do Livramento**. Lisboa – Portugal, 1996. Disponível em: < <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/106.pdf>>, Acesso em: 05/11/2008.
- SOARES, S. R. Análise Multicritério com Instrumento de Gestão Ambiental. Florianópolis, 2003, 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2003.
- SOARES, M. E. S.; RAMOS, R. A. R.; e MENDES, J. F. G. **Modelo espacial de avaliação do uso do solo em ambiente SIG: O caso da localização industrial**. Minho - Portugal, 2005. Disponível em: <[https://repositorium.sdum.uminho.pt/.](https://repositorium.sdum.uminho.pt/)> Acesso em: 25/06/2008.
- SOUZA, C.P; SIRTOLI, A.E.; LIMA, M.R.; DONHA, A.G. Estudo do meio físico na avaliação de bacias hidrográficas utilizadas como mananciais de abastecimento. In: ANDREOLI, C.V & CARNEIRO, C. **Gestão Integrada de mananciais de abastecimento eutrofizados**. Curitiba: Sanepar, Finep 2005. 15p.
- SPÖR, C. e ROSS, J.L.S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, n 15, p. 39-49, 2004.
- STREHER, A. e SCHÄFER, A. **Utilização do índice químico (BACH, 1980) no Rio Três Forquilhas, RS, como instrumento de avaliação da qualidade da água**. (59ª Reunião Anual da SBPC – Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência). Belém, 2007. Disponível em: <<http://www.servicos.sbpnet.org.br/sbpc/59ra/senior/livroeletronico/resumos/R7242-1.html>.> Acesso em: 18/08/2008.
- SCHAETZEL, R. e ANDERSON S. **Soils: genesis and geomorphology**. Cambridge: Ed: Cambridge, 2005.
- TESFAMARIAN, S. e SADIQ, R. Probabilistic risk analysis using Ordered Weighted Averaging (OWA) Operators. **Stochastic Environmental Research and Risk Assentment**, v.22, n.1, p. 1-15, 2008.

- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. **Capítulo 3: Uso e manejo sustentável do solo Na agricultura: Avaliação.** Aulas Teóricas. Florianópolis-SC: [s.n], 2008 (nota de aulas). Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/teses98/toresan/cap3.html>>. Acesso em: 12/07/2008.
- USP – Universidade de São Paulo. **Análise da água.** (Série: Projeto Ciência) São Paulo, 2008a. Disponível em: <<http://educar.sc.usp.br/biologia/prociencias/qagua.htm>>. Acesso em: 11/08/2008.
- USP – Universidade de São Paulo. **Avaliação Multicritério.** (Série: Publicações Científicas) São Paulo, 2008b. Disponível em: <www.stt.eesc.usp.br/anelson/BasesSIG/AvMulto.ppt> . Acesso em: 01/06/2008.
- VIEIRA, J. M. P.; MORAES, C. **Manual para a elaboração de Planos de Segurança da Água para consumo humano.** (Série Guias Técnicos, 7) Minho – Portugal, 2005. Instituto Regulador de Águas e Resíduos - Universidade do Minho, Portugal, 2005. 175p.
- VILAS BOAS, C.L. Análise de aplicação de métodos multicritério de apoio a decisão (MMAD) na gestão de recursos hídricos. Brasília, 2004. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/go>> Acesso em: 06/11/2008.
- VOOGD, H. **Multicriteria Evaluation for urban e regional planning.** Londres - UK: Ed: Pion, 1983. 296p.
- ZAMBON, K.L; CARNEIRO, A.A.F.M; SILVA, A.N.R; NEGRI, J.C. **Análise de decisão multicritério na localização de usinas termelétricas utilizando SIG.** São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pope/v25n2/25705.pdf>> Acesso em: 17/10/2008.
- WHO - World Health Organization. **Guidelines for drinking water quality: incorporating first addendum.** Volume 1. Recommendations. 3rd. ed. Genebra: WHO, 2006. 595 p. Disponível em: <<http://www.who.int/>> Acesso em: 19/08/ 2008.
- WISCHMEIER, W.H. e SMITH, D.D.; **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington – USA: Ed: USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537)
- WRIGHT, J.T.C. e GIOVINAZZO, R.A. DELPHI – Uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. **Caderno de Pesquisas em Administração**, v. 01, nº 12, p.12-16, 2000

ANEXO 1

Questionário do método Delphi (Apresentação):



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FUNDAÇÃO ARTHUR BERNARDES

Apresentação

Essa consulta é parte integrante do Projeto Piloto de pesquisa sobre Plano de Segurança da Água (PSA) no município de Viçosa, a ser executado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) no âmbito do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração de saneamento ambiental e sistema de informação geográfica, sob a orientação dos Professores Adjuntos do Departamento de Engenharia Civil - UFV (DEC/UFV) Dr. Rafael Kopschitz Xavier Bastos e Dr. Carlos Antônio Oliveira Vieira e Dr. e Departamento de Solos Dr. Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Uma das etapas das pesquisas consiste em consultar a opinião de especialistas sobre a importância de algumas variáveis relacionadas à definição de critérios para identificação de áreas de riscos em manancial de abastecimento de água. A ponderação dessas variáveis será desenvolvida a partir da atribuição de pesos que representarão o grau de importância de cada uma, dentro do seu grupo específico. Posteriormente, através de método estatístico apropriado, essas variáveis serão agregadas para constituir os critérios que interferem na qualidade da água em manancial de abastecimento de água.

O questionário foi desenvolvido de modo que o especialista não disponibilize muito tempo para respondê-lo. As respostas serão tratadas de forma agregada, sem identificação dos respondentes, entretanto o trabalho consignará o devido crédito aos especialistas que participarem. Ressalta-se que o especialista poderá se abster de julgamento, bem como tecer comentários em campo específico.

Solicitamos que a resposta desse questionário seja enviada até o dia **30 de setembro de 2008**. Agradecemos sua colaboração e nos colocamos à disposição para quaisquer esclarecimentos que se façam necessários. Ressaltamos a importância de sua participação para a continuidade dos trabalhos e enriquecimento das pesquisas.

<p>Carlos H. Crespo Aluno do mestrado em Informações Geográficas da UFV/DEC (31) 8441-4192 carcrespo_ufv@yahoo.com.br</p> <p>Carlos Antônio Oliveira Vieira Professor do Departamento de Engenharia Civil, Engenheiro Agrimensor, PhD em Geografia Física (University of Nottingham, UK), Pós-Doutorado em Geomática (University of Melbourne, Australia). carlos.vieira@ufv.br (31) 38992036</p>	<p>Nolan Ribeiro Bezerra Aluna do doutorado em Saneamento Ambiental da UFV/DEC (31) 38992356/93031795 nolanbezerra@gmail.com</p> <p>Rafael Kopschitz Xavier Bastos Professor do Departamento de Engenharia Civil, Engenheiro Civil, PhD em Engenharia Sanitária (University of Leeds, UK) rkxb@ufv.br (31) 3899-2356 /2826</p>
---	---

IR PARA INTRODUÇÃO PARA DEFINIÇÃO CRITÉRIOS

Questionário do método Delphi (Introdução):

Definição de Critérios que interferem na qualidade da água

A quantidade de água que escoar depende da intensidade da chuva e da capacidade de infiltração do solo. Quando a água da chuva atinge o solo e escoar sobre ele, inicia-se um processo de dissolução e arraste que transportará material retirado do solo levando-os até os corpos d'água. Estes compostos podem incluir desde ácidos húmicos até compostos orgânicos sintéticos como detergentes, pesticidas e solventes (PORTO et al., 1991).

A qualidade da água superficial depende do clima, da geomorfologia da região, da vegetação, do tipo de ecossistema aquático e da influência do homem. Dessa forma, os critérios a serem adotados para elaboração do mapa de perigos na bacia são: i) Declividade, ii) Tipos de solos, iii) Fluxo acumulado, iv) uso e ocupação do solos.

Em técnicas de análise multicritérios procura-se agrupar todos os critérios em uma mesma escala, de forma que possam ser ponderados. Neste trabalho optou-se pela atribuição de valores de 0 a 100 para várias 'classes' de cada critério, sendo que 'zero' implicaria 'impacto nulo' ou 'desprezível' sobre a qualidade da água e, no outro extremo, 100 implicaria 'impacto máximo'. Cumpre destacar que, para efeito deste trabalho, 'impactos sobre a qualidade da água' referem-se a 'perigos' ('grau de risco potencial') introduzidos, tendo em vista o tratamento e abastecimento para consumo humano.

A fim de se colocar todos os critérios em uma mesma escala para que eles possam ser ponderados e desta forma realizar a análise multicritérios, e conseqüentemente gerar o mapa de perigo da bacia, pede-se para avaliar as diferentes classes estabelecidas, atribuindo valores que variam de 0 a 100, onde:

Classe	Critério
0	Implicaria 'impacto nulo' ou 'desprezível' sobre a qualidade da água para o abastecimento
100	Implicaria 'impacto máximo sobre a qualidade da água para o abastecimento

Os critérios devem possuir classes com valores máximos em cm valores próximo ao mínimo, não necessariamente zero, a fim de que aquela classe não se torne ausente no processo de geração do mapa de risco.

Como orientação às respostas, o informante deve imaginar que tipo de perigo poderia ser introduzido, preponderantemente, em cada critério avaliado, por exemplo, substâncias químicas inorgânicas (ex.: ferro e manganês), agrotóxicos, microrganismos, elevação de turbidez, cor, etc..

Para melhor homogeneização das respostas, um perigo decorrente da poluição por indústrias, agropecuárias, mineração, etc é sempre pior se comparado há um perigo das atividades de assoreamento, devido a possibilidade de tratamento dado a eles nas ETAs.

[VOLTAR PARA PÁGINA INICIAL](#)

[IR PARA AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS](#)

Questionário do método Delphi (Avaliação dos Critérios):

Caso você fosse atribuir grau de perigo que interferem na qualidade da água para o abastecimento, que grau de perigo você atribuiria a cada uma das seguintes classes?

CRITÉRIO 1 – Declividade

Classes de declividade (%)	Grau de perigo (0-100)
< 3	
3 a 8	
8 a 20	
20 a 45	
45 a 75	
> 75	

Você acha que o número de classes é adequado?

Caso negativo, sugira outro número de classes e respectivos intervalos?

Se julgar necessário justifique sua resposta.

CRITÉRIO 2 – Tipos de Solos

Classes de solos	Grau de perigo (0-100)
Cambissolo Háplico	
Gleissolo Háplico	
Latosolo Vermelho-Amarelo	
Argissolo Vermelho-Amarelo	

OBS.: Procura-se avaliar qual o impacto das diferentes classes de solos existentes na paisagem na qualidade da água que chega até a estação de tratamento. Na avaliação sugere-se levar em conta tanto a água que escorre superficialmente que pode transportar sedimentos, matéria orgânica, cátions e ânions existentes no solo, assim como na água que infiltra no perfil do solo e que alimenta as nascentes de rios e córregos. Considerar ainda que condições

reduzidas nos solos devido à má drenagem podem solubilizar formas de ferro e manganês que em teores elevados podem alterar a qualidade da água de um manancial.

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário justifique sua resposta.

CRITÉRIO 3 – Uso e Ocupação da terra

Classes de uso e ocupação da terra	Grau de perigo (0-100)
Olericulturas	
Café	
Culturas anuais (milho/feijão)	
Solo Exposto	
Áreas urbanas	
Áreas industriais	
Pastagem degradada	
Pastagem não degradada	
Formações florestais nativas (mata e capoeira)	

OBS.: Como orientações a essa questão, pode-se considerar que:

- (i) a agricultura faz uso de agrotóxicos para seu desenvolvimento, os quais, em geral, não são removidos de forma efetiva em estações de tratamento de água (ETA) que empregam processos convencionais.
- (ii) a agricultura faz uso de fertilizantes, os quais contribuem para processos de eutrofização dos corpos d'água.
- (iii) solos expostos são mais susceptíveis a processos erosivos, elevando a turbidez da água e potencializando processos de assoreamento de corpos d'água represados..
- (iv) Áreas urbanas são, em geral, fontes de poluentes e contaminantes, tais como: matéria orgânica, nutrientes (N, P), microrganismos patogênicos.
- (v) Pastagens (degradadas ou não) estão associadas à produção animal, constituindo fontes (difusas) de poluentes e contaminantes, tais como: matéria orgânica, nutrientes (N, P), microrganismos patogênicos.
- (vi) Capoeiras (mata de baixo porte) e formações florestais podem atuar no amortecimento do escoamento superficial.

Naturalmente, os comentários acima, constituem apenas lembretes, os quais podem ser ignorados, refutados ou acrescidos de outros.

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário justifique sua resposta.

CRITÉRIO 4 – Fluxo Acumulado

Classes de fluxo acumulado	Grau de perigo (0-100)
Acima de 25000 m ² (próprio curso d'água)	
6250 a 25000 m ² de contribuição	
1250 a 6250 m ² de contribuição	
0 a 1250 m ² de contribuição	

OBS.: No programa utilizado (ArcGIS), o fluxo acumulado representa o fluxo superficial da água a montante de um determinado ponto do terreno, sendo gerado a partir da geometria e da declividade das encostas. A partir da direção do fluxo, o fluxo acumulado é obtido somando-se a área das células (quantidade de células ou pixels) na direção do fluxo (escoamento) até o curso d'água. Para efeito dessa consulta, a questão é formulada em termos de área (m²), uma vez que cada pixel possui 25 m².

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário justifique sua resposta.

CRITÉRIO 5 – Ponderação das Camadas de Informação

Classes de fluxo acumulado	Grau de perigo (0-100)
Uso e Ocupação	
Declividade	
Tipo de Solo	
Fluxo Acumulado	
Distância das Fontes de Poluição	

OBS.: Depois de feita essa homogeneização dos valores de todos os critérios, sejam eles fatores ou restrições, é que se determinam os pesos de cada um dos fatores.

A grande dificuldade encontrada é atribuir um valor numérico aos critérios de forma direta, porém é relativamente mais simples fazer comparações através de avaliação semântica, ou seja, identificar se o critério é mais ou menos importante no processo dentre todos os critérios utilizados na análise. Esse é o raciocínio adotado para maior parte dos métodos de ponderação (UFSC, 2008).

Portanto atribua notas de 0 a 100, de acordo com risco que você acha que cada camada de informação pode prover ao sistema de abastecimento de água.

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário justifique sua resposta.

ENCERRAR

VOLTAR A PÁGINA INICIAL

PARA DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS