

EDNEYA GOMES DA SILVA SOARES

**MAPEAMENTO DE PERIGOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO**

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
2009

EDNEYA GOMES DA SILVA SOARES

**MAPEAMENTO DE PERIGOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO**

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: 3 de setembro de 2009.

Prof^ª Maria Lúcia Calijuri
(Coorientadora)

Prof. Marcelo Libânio

Prof. Jürgen Wilhelm Philips

Prof. Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro

Prof. Carlos Antônio Oliveira Vieira
(Orientador)

“A ciência humana de maneira nenhuma nega a existência de Deus. Quando considero quantas e quão maravilhosas coisas o homem compreende, pesquisa e consegue realizar, então reconheço claramente que o espírito humano é obra de Deus, e a mais notável”

(Galileu Galilei).

*A Deus, aos meus pais **Maria Gomes e Domingos,**
à minha irmã **Sandra Mara,** ao meu sobrinho **Lucas Gomes Rabelo,**
E aos meus avós **Maria Rosa e Isídio Gomes,**
dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus minha fortaleza.

À minha mãe e irmã que mesmo com a distância estiveram sempre presente, obrigada por tudo que fizeram por mim e por tudo que são capazes de fazer (amo muito vocês).

Momento oportuno para agradecer aos meus tios Estela Mares e Antônio dos Anjos pelo carinho e apoio infinitos.

À tia Gorete que sempre torceu por mim, deixando muitas saudades.

Às duas grandes pessoas que considero muito, Marta Cristiane e Márcia Cristina.

À Vânia Maria pela amizade, incentivo e credibilidade.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do mestrado.

À Divisão de Água e Esgoto da Universidade Federal de Viçosa (UFV), por permitir o desenvolvimento deste trabalho inserido no projeto Plano de Segurança da Água (PSA) e pela disponibilidade de uma bolsa.

Ao Sistema Autônomo de Abastecimento de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE) pelo apoio e disponibilidade.

À prefeitura de Viçosa pela contribuição de informações.

Ao Professor Orientador Carlos Antônio Oliveira Vieira, pela orientação, dedicação ao estudo, incentivo, profissionalismo ético e amizade.

Ao Professor Coorientador Rafael Kopschitz Xavier Bastos, pela orientação e contribuições positivas para este estudo em todas as etapas, de grande relevância para o desenvolvimento desta dissertação.

À Professora Coorientadora Maria Lúcia Calijuri, pelas contribuições acadêmicas.

À Nolan Ribeiro Bezerra (doutorado), que muito contribuiu para o desenvolvimento desta dissertação em todas as etapas, com muita paciência e dedicação.

Ao professor Júlio César de Oliveira, por dispor de atenção para a discussão de dúvidas encontradas no trabalho.

Aos amigos do mestrado pelos momentos de estudo e amizade Sandro Farias, Leonardo Campos (Léo/doutorado), Carlos Crespo, Sebastião Jr. (Tião/doutorado),

Julierme Wagner, Tatiane Vilela (Tati), Leandro Carvalho (Zé), Kelison, Antônio Prata (doutorado), Grazy, Leila, Inês, Afonso, Wellington e principalmente ao amigo Leandro Poletto pela ajuda, incentivo e amizade.

Aos meninos da Divisão de Água e Esgoto da UFV pela amizade e trabalho em equipe, Ricardo Gomes (Cocó) e Ulisses Bifano.

À Suelem Farias e José Horta do setor de Geoprocessamento do SAAE pela atenção e disponibilidades incontáveis.

Às “meninas” da república pela excelente convivência e respeito mútuo, Letícia Fonseca, Marcela Acharezzi, Mariele Cristina e Patrícia Ricardino (Paty).

Às minhas amigas Kátia Divina, Neura Lima, Márcia Ferreira e Maria Luciene.

Aos que não mencionei e que torceram por mim na conquista de mais uma etapa, meus mais sinceros agradecimentos!

BIOGRAFIA

Edneya Gomes da Silva Soares, filha de Domingos da Silva Soares e Maria Gomes da Silva, nasceu em Brasília – DF.

Em 1998, ingressou no Curso de Geografia na Universidade Federal de Goiás, Goiânia - GO, concluindo a graduação em 2001.

Em 2003, ingressou no Curso de Tecnologia em Geoprocessamento no Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Goiânia – GO, concluindo no ano de 2007.

Em agosto de 2007, ingressou na pós-graduação através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração em Informações Espaciais, Linha de Pesquisa Geoprocessamento, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em 3 de setembro de 2009.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Estruturação da dissertação.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1 Potabilidade e segurança da água para consumo humano.....	4
2.2 Planos de Segurança da Água.....	5
2.3 Os conceitos de perigo e risco e as etapas da metodologia de Avaliação de Risco....	7
2.4 Qualidade da água para consumo humano.....	9
2.5 Índice da Qualidade da Água.....	14
2.6 Perigos potenciais em redes de distribuição de água.....	16
2.7 Modelo de Simulação Computacional de Hidráulica - EPANET.....	17
2.8 Sistemas de Informações Geográficas.....	20
2.9 Relação do Modelo de Simulação Computacional de Hidráulica e SIG.....	24
2.10 Métodos de estimativa pontual.....	25
2.11 Análise Multicritério.....	26
2.11.1 Estudo dos Critérios / Pesos.....	28
2.11.2 Re-escalonamento dos Critérios.....	30
2.11.3 Exploração das ferramentas SIG na análise multicritério.....	30
3. METÓDO APLICADO.....	34
3.1 Localização e caracterização da área em estudo.....	36
3.2 A rede de abastecimento de água do município de Viçosa.....	37
3.3 Softwares e dados utilizados neste estudo.....	40
3.4 Aplicação do Modelo de Simulação de Hidráulica - EPANET.....	41
3.5 Representação dos dados de registro de reclamações.....	48
3.6 Representação dos dados da qualidade da água no SIG.....	50
3.7 Aquisição do Índice da Qualidade da Água.....	51
3.8 Re-escalonamento dos mapas.....	53
3.8.1 Pesos.....	55

4.	RESULTADOS	59
4.1	Mapa de Pressão	59
4.2	Interpolação das variáveis distribuídas no SIG	61
4.3	Mapas de identificação integrada de perigos	65
4.3.1	Primeiro Cenário.....	65
4.3.2	Segundo Cenário.....	66
4.3.3	Terceiro Cenário	67
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	ANEXO A	77
	ANEXO B	78
	ANEXO C	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	<i>Automated Mapping</i>
APPC	Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle
ASCII	Código padrão americano para intercâmbio de informação
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Mapping</i>
FM	<i>Facility Management</i>
GDWQ	<i>Guidelines for Drinking – Water Quality</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQA	Índice da Qualidade da Água
MCA	Metro de coluna de água
MCE	<i>Multi Criteria Evaluation</i>
MSCH	Modelo de Simulação Computacional de Hidráulica
OMS	Organização Mundial da Saúde
OWA	<i>Ordered Weighted Average</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PSA	Plano de Segurança da Água
SAAE	Serviço Autônomo de Abastecimento de Água e Esgoto
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
uH	Unidade Hazen
uT	Unidade de Turbidez
VMP	Valor Máximo Permitido
VRP	Válvulas Reguladoras de Pressão
WLC	<i>Weight Linear Combination</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura para a segurança da água para consumo humano.	6
Figura 2. Componentes físicos do EPANET.....	19
Figura 3. Arquitetura de SIG.....	22
Figura 4. Integração SIG-MSCH	24
Figura 5. Interpolação IDW	25
Figura 6. Sequência operacional da análise multicritério no software IDRISI.....	31
Figura 7. Gráficos da função <i>Sigmoidal monotônica</i> crescente e decrescente.	32
Figura 8. Fluxograma da metodologia de pesquisa.....	35
Figura 9. Representação municipal de Viçosa e bairros.	36
Figura 10. Representação espacial dos bairros e sistema de rede de água de Viçosa.	38
Figura 11. Representação da rede de distribuição de água SIG e MSCH.....	42
Figura 12. Rede de água no EPANET, à esquerda sem os Nós, à direita com os Nós.	42
Figura 13. “Zonas de consumo” para a determinação do consumo-base dos Nós.....	43
Figura 14. Dados padrões de entrada e saída do modelo EPANET.....	44
Figura 15. Dados do padrão temporal no EPANET.....	46
Figura 16. Dados de calibração para pressão e vazão de rede de água de Viçosa.	47
Figura 17. Organização dos dados de registro de reclamações em tabela Access.....	48
Figura 18. Descrição dos fatores e respectiva função <i>Fuzzy</i>	55
Figura 19. Matriz de comparação pareada para o primeiro cenário.....	56
Figura 20. Matriz de comparação pareada para o segundo cenário.	57
Figura 21. Matriz de comparação pareada para o terceiro cenário.	58
Figura 22. Mapa de pressão na rede às 13:00 h	60
Figura 23. Valores de pressão e vazão simulados.....	61
Figura 24. Mapas das camadas de informações (<i>layers</i>) - interpolados.	65
Figura 25. Mapa MCE – WLC – Primeiro Cenário.....	66
Figura 26. Mapa MCE – WLC – Segundo Cenário.....	67
Figura 27. Mapa MCE – WLC – Terceiro Cenário.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Teores de cloro livre (mg/L) a serem mantidos em sistemas de abastecimento de água para consumo humano, Portaria MS nº. 518/2004.	12
Tabela 2. Limites recomendados para íon fluoreto, Portaria nº635/BSB/1975 (mg/L).	14
Tabela 3. Classificação da qualidade da água de acordo com o IQA utilizado.	15
Tabela 4. Escala de comparação de critérios.	29
Tabela 5. Escala de comparações de critérios.	29
Tabela 6. Representação do número de ligações por bairros em 2008.	39
Tabela 7. Relação dos dados utilizados no trabalho.	41
Tabela 8. Cálculo do Fator Multiplicativo.	46
Tabela 9. Variáveis utilizadas na modelagem da rede de água de Viçosa.	47
Tabela 10. Lista dos motivos de reclamações utilizados no estudo.	49
Tabela 11. Registro de reclamações na rede de água.	50
Tabela 12. Parâmetros da qualidade da água para o cálculo do IQA.	52
Tabela 13. Faixa de aceitação dos parâmetros utilizados no IQA.	53
Tabela 14. Pesos finais resultantes da comparação pareada para o primeiro cenário.	56
Tabela 15. Pesos finais resultantes da comparação pareada para o segundo cenário.	57
Tabela 16. Pesos finais resultantes da comparação pareada para o terceiro cenário.	58
Tabela A.1 Dados de Pressão.	77
Tabela B.1 Dados de Registros de Reclamações e Intermitência.	78
Tabela C.1 Dados dos Parâmetros da Qualidade Água.	79

RESUMO

SOARES, Edneya Gomes da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2009. **Mapeamento de perigos em redes de distribuição de água para consumo humano.** Orientador: Carlos Antônio Oliveira Vieira. Coorientadores: Rafael Kopschitz Xavier Bastos e Maria Lúcia Calijuri.

O presente trabalho tem como finalidade propor a aplicação de uma metodologia para a identificação de perigos e mapeamento de riscos em redes de distribuição de água para consumo humano com a aplicação de técnicas de Sistema de Informações Geográficas e análise multicritério. O estudo de caso foi desenvolvido no município de Viçosa - MG, no âmbito do projeto 'Plano de Segurança da Água' em curso no mesmo município. Foram selecionadas as seguintes variáveis que possam constituir perigos ou eventos perigosos: parâmetros de qualidade da água (dados de monitoramento de rotina do SAAE-Viçosa), pressão na rede, registro de reclamações dos consumidores e registros de intermitência no fornecimento de água. Para a obtenção do mapa de pressões da rede foi utilizado o programa EPANET, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA). Para a espacialização das informações foi utilizado o programa ArcView. Todas essas informações foram importadas pelo programa IDRISI para a execução da análise multicritério e geração de mapa de perigos. Os mapas foram gerados considerando três 'cenários', envolvendo diferentes combinações dos parâmetros selecionados como indicativos de perigos. Os resultados obtidos nos três 'cenários' foram semelhantes, prevalecendo graus de perigos/riscos potenciais baixos em toda a área analisada. Os resultados sugerem que a ferramenta proposta apresenta potencial de aplicação, considerando a espacialização de dados de monitoramento de qualidade da água individualmente, ou de forma integrada na espécie de 'Índices de Qualidade da Água', ou ainda quando se consideram variáveis qualitativas, tais como os registros de reclamações e de intermitência.

ABSTRACT

SOARES, Edneya Gomes da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, september of 2009. **Mapping hazards in distribution networks for drinking water.** Adviser: Carlos Antônio Oliveira Vieira. Co-Adviser: Rafael Kopschitz Xavier Bastos and Maria Lúcia Calijuri.

The present work aims to propose the use of a methodology for identifying hazards and risk mapping in the distribution networks of water for human consumption with the application of techniques of Geographic Information Systems and multicriteria analysis. The case study was developed in Viçosa - MG, under the project 'Water Safety Plan' underway in the same municipality. We selected the following variables that could be hazards or hazardous events: water quality parameters (data from routine monitoring of SAAE-Viçosa), pressure on the network, record of consumer complaints and records of intermittency in the supply of water. To obtain the pressure map of the network was used EPANET program, developed by the U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). For the spatial information was used ArcView program. All these information were imported into the IDRISI program to perform the analysis and generation of multi-hazard map. The maps were generated considering three 'scenery', involving different combinations of parameters selected as indicative of danger. The results obtained in the three 'scenery' were similar, prevailing levels of hazards/risks low throughout the area examined. The results suggest that the proposal has a potential tool for the application, considering the spatial data for monitoring water quality individually, or in an integrated way in the form of 'Water Quality Index', or when considering qualitative variables, such as the records of complaints and intermittency.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a garantia da segurança da água para consumo humano passa por revisão de seus paradigmas, tornando evidente que os mecanismos de monitoramento de conformidade por meio do controle laboratorial não são suficientes. Mesmo em países industrializados com elevado padrão tecnológico em abastecimento de água, tem ocorrido a notificação de doenças de transmissão hídrica, devido a problemas não detectados e, ou, não solucionados em tempo hábil (HRUDEY e HRUDEY, 2004).

Nesse sentido, a Organização Mundial da Saúde (OMS), no sentido de também incorporar o conceito de “água segura” a partir da segunda, mas principalmente na terceira edição dos *Guidelines for Drinking Water Quality* (GDWQ), enfatiza que o recurso a ferramentas de avaliação e gerenciamento de riscos, aplicadas de forma abrangente e integradas, desde a captação até a distribuição, constitui a forma mais efetiva de garantia da segurança da qualidade da água para consumo humano. Tal abordagem, na terceira edição dos Guias da OMS, recebe a denominação de Planos de Segurança da Água (*Water Safety Plans*) (WHO, 2004).

Os Planos de Segurança da Água consistem no documento que identifica e prioriza riscos potenciais no sistema de abastecimento, abrangendo todas as etapas desde o manancial aos consumidores, através de medidas de controle que envolvem a redução ou eliminação de riscos à qualidade da água produzida (WHO, 2004).

A identificação de perigos e a caracterização de risco nos sistemas de distribuição, preconizadas nestes Planos de Segurança da Água, colocam diferentes desafios para a gestão dos riscos, pois nem sempre esses riscos são tão facilmente identificados, como por exemplo, nas etapas do tratamento.

Mesmo que o tratamento da água seja eficiente, o sistema de distribuição está sujeito a vulnerabilidades, tais como: corrosão, infiltrações, rupturas e desenvolvimento de biofilmes, que podem levar a deterioração ou contaminação da água de consumo.

A implementação de medidas preventivas ou corretivas para o controle de tais eventos ou situações demandam a identificação dos locais **onde** possam estar

ocorrendo tais interferências. Segundo Câmara *et al.* (1999), quando a palavra **onde** surge, ao ser questionado um problema, a solução apresentada pode ser otimizada através de técnicas automatizadas, com a possibilidade da aplicação do Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Nessa perspectiva as técnicas de análise multicritério aliadas aos SIGs, apresentam grande potencial de aplicação na identificação e mapeamento de perigos (ou ‘eventos perigosos’) em sistemas de distribuição de água, dada à natureza complexa e dinâmica, no tempo e no espaço, da qualidade da água nestes ambientes. O uso de SIG permite obter camadas (*layers*) de informações (critérios ou variáveis que possam interferir na qualidade da água) e espacializá-las. Por sua vez, a análise multicritério, como técnica de apoio à tomada de decisões, permite a ponderação e discriminação dos critérios considerados, de forma a exprimir quantitativamente a importância relativa de cada um e, por fim, sua análise integrada em ambiente de geoprocessamento (BEZDEK e PAL, 1992).

A partir do mapa de risco é possível propor as medidas preventivas e necessárias para proteção da rede de distribuição, conforme preconiza a Portaria MS nº. 518/2004.

Este estudo está voltado para o desenvolvimento de propostas metodológicas para a identificação de perigos e mapeamento de riscos em redes de distribuição de água, com a aplicação das técnicas de Sistemas de Informações Geográficas e análise multicritério.

O trabalho descrito integra o projeto Plano de Segurança da Água, financiado pelo Ministério da Saúde, pelas agências norteamericanas *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).

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é testar as técnicas de SIG para a identificação e mapeamento de perigos em redes de distribuição de água no âmbito de Planos de Segurança da Água.

Os objetivos específicos são:

- Espacializar os dados da qualidade da água, provenientes de amostras coletadas na rede de distribuição de água, como variáveis representativas de perigos.
- Gerar mapa do risco potencial através das técnicas de análise multicritério.

1.2 Estruturação da dissertação

A organização desta dissertação está dividida em capítulos. No primeiro encontram-se a introdução e os objetivos.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica sobre o uso do SIG para o mapeamento de riscos em redes de distribuição de água, descrito nos seguintes tópicos: Potabilidade e segurança da água para consumo humano; Planos de Segurança da Água; Conceitos de perigos e riscos; Qualidade da água; Índice da Qualidade de Água; Perigos potenciais em redes de distribuição de água; Modelos de simulação em redes de distribuição de água; Sistemas de Informações Geográficas; Análise Multicritério.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia desenvolvida, a caracterização da área de estudo, os dados e *softwares* utilizados.

Os demais capítulos consistem em apresentar os resultados, conclusão e recomendação para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica que permeia os aspectos conceituais sobre a qualidade da água para consumo humano, bem como os critérios e parâmetros que interferem na sua qualidade, e por fim a descrição das técnicas e ferramentas adequadas de SIG para o mapeamento de riscos potenciais na rede de água.

2.1 Potabilidade e segurança da água para consumo humano

Tradicionalmente, a qualidade da água para consumo humano é definida por um conjunto de parâmetros (físicos, químicos e microbiológicos) e respectivas concentrações-limite (valores máximos permitidos – VMP), os quais definem o padrão de potabilidade. Consequentemente, a abordagem tradicional para a verificação de atendimento ao padrão de potabilidade, tem sido o monitoramento da água tratada de acordo com planos mínimos de amostragem em geral definidos nas próprias normas de potabilidade da água ou em regulamentação complementar.

Entretanto, mais recentemente, tem sido reconhecido que o controle laboratorial da qualidade da água para consumo humano e a mera verificação de cumprimento do padrão de potabilidade não são suficientes para a garantia de sua ‘segurança’, devido a fatores tais como: (i) o contínuo ‘aparecimento’ de questões ou contaminantes (químicos e microbiológicos) emergentes; (ii) limitações de ordem analítica ou financeira do controle laboratorial, (iii) a inexistência de parâmetros indicadores da qualidade da água de emprego universal (por exemplo, organismos indicadores de contaminação, turbidez ou os parâmetros de controle da desinfecção); (iv) limitações inerentes ao princípio amostral (baseado na coleta de amostras em determinado volume e frequência); (v) a dificuldade ou mesmo impossibilidade (dependendo do parâmetro) de monitoramento em tempo real (BASTOS, 2007).

Portanto, na definição da Organização Mundial da Saúde (OMS), segurança da água para consumo humano assume uma conotação mais ampla que potabilidade - “água segura para consumo humano é aquela que não representa risco significativo à

saúde humana durante o consumo por toda a vida, incluindo as sensibilidades inerentes a cada estágio de vida” (WHO, 2005).

É interessante notar que a norma brasileira, desde 2000¹, já assume essa visão preventiva, para além do mero controle laboratorial, de “enfoque sistêmico de gerenciamento de riscos, considerando a dinâmica da água desde o manancial até o consumo” (BASTOS *et al.*, 2001), como, por exemplo, o estabelecido no inciso III do artigo 9º da Portaria MS nº. 518/2004:

Art. 9.º Ao(s) responsável(is) pela operação de sistema de abastecimento de água incumbe:

III - 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;

No entanto, como ressaltado por Bastos *et al.* (2007a), isso 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. De toda maneira, na visão dos referidos autores, estão presentes na legislação brasileira os pilares para o desenvolvimento de ‘Planos de Segurança da Água’, os quais constituem exatamente tal ferramenta metodológica para a sistemática avaliação de risco em sistemas de abastecimento de água.

2.2 Planos de Segurança da Água

Os Planos de Segurança da Água (PSA) são definidos como um instrumento que identifica e prioriza perigos e riscos em um sistema de abastecimento de água, desde o manancial até o consumidor, visando estabelecer medidas de controle e planos de gerenciamento para minimizar as chances de falhas e, ainda, para responder a eventuais falhas no sistema ou eventos imprevistos (WHO, 2005). Tem como objetivo garantir a segurança da água para consumo humano, por meio da implementação de boas práticas no sistema de abastecimento de água com vistas à minimização da contaminação nos mananciais de abastecimento, à otimização da

remoção dos contaminantes durante o processo de tratamento e à prevenção de pós-contaminação no sistema de distribuição para o consumo.

Um PSA inclui três componentes centrais, conforme ilustrado na Figura 1 (WHO, 2004; WHO, 2005) e descrito a seguir:

a) a avaliação do sistema de abastecimento de água, no tempo e no espaço e em todos os seus componentes, de forma a facilitar seu melhor conhecimento possível, identificar pontos de estabilidade na produção e fornecimento de água segura para consumo e, ou, vulneráveis (perigos e pontos críticos).

b) o monitoramento do sistema, para os perigos identificados, acompanhado da prescrição, especificação de medidas ou protocolos de monitoramento, de forma que qualquer desvio da performance desejada possa ser prontamente corrigido.

c) planos de gestão é toda a documentação do diagnóstico e do estabelecimento de 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) (BASTOS *et al.*, 2007).

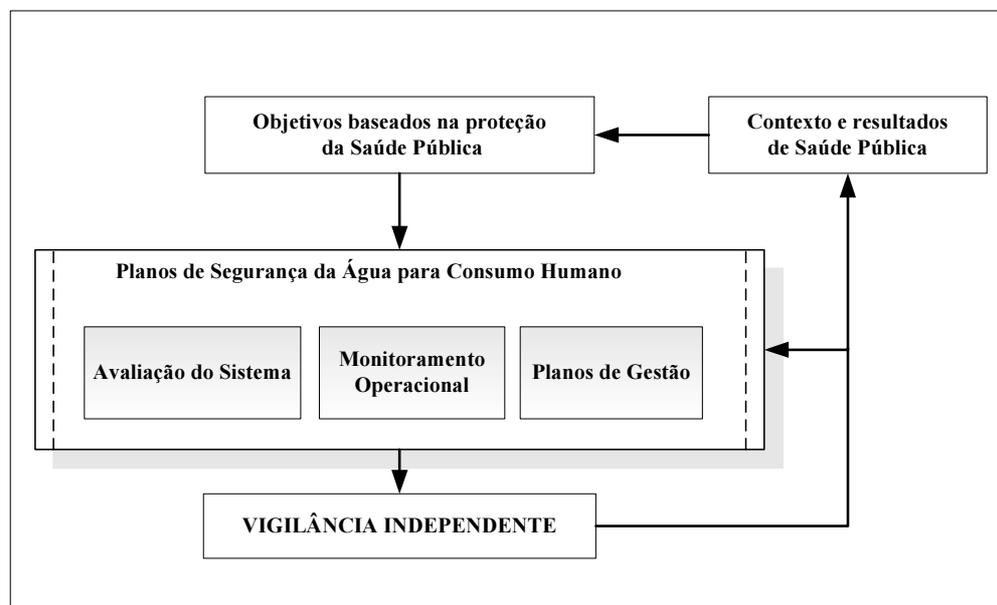


Figura 1. Estrutura para a segurança da água para consumo humano.

(Fonte: WHO, 2004).

Os elementos básicos do PSA são baseados nos princípios e conceitos de múltiplas barreiras, análise de perigos e pontos críticos de controle (APPCC), avaliação e gestão de riscos e gestão de qualidade (normas de certificação ISO) (BARTRAM *et al.*, 2001, AS/NZS, 2004, VIEIRA e MORAIS, 2005).

Assim, conforme Bastos *et al.* (2009), na medida em que o sistema de abastecimento é descrito, analisadas as vulnerabilidades e identificados os principais perigos, é possível a tomada de decisão em relação aos riscos mais relevantes, os quais podem ser eliminados ou minimizados ou simplesmente assumidos como toleráveis.

2.3 Os conceitos de perigo e risco e as etapas da metodologia de Avaliação de Risco

Os termos ‘risco’ e ‘perigo’ (em inglês, *hazard*), embora por vezes utilizados indiscriminadamente no discurso comum, no campo científico guardam significados distintos, sendo ‘perigo’ uma propriedade qualitativa, enquanto ‘risco’ é uma grandeza quantitativa e probabilística (RAZZOLINI e NARDOCCI, 2006).

De acordo com Freitas e Gomez (1997), o conceito de risco que se conhece atualmente provém da teoria das probabilidades, ou seja, pressupõe a possibilidade de prever e traduzir estatisticamente a ocorrência de determinadas situações ou eventos e a magnitude de suas consequências.

‘Perigo’ pode ser compreendido como as propriedades inerentes de um agente (biológico, químico ou físico) que, em uma condição de exposição, possam implicar algum efeito adverso à saúde, esse último traduzido no conceito de risco (FREITAS, 2002; BASTOS *et al.*, 2009). Em abordagem mais ampla, o conceito de perigo vincula-se a qualquer tipo de situação (‘eventos perigosos’) seja de causas naturais ou não (terremotos, acidentes no trânsito, etc), que possam introduzir perigos (WHO, 2006).

No campo do abastecimento de água para consumo humano, como exemplificado por Bastos *et al.* (2009), a presença na água de organismos patogênicos ou de substâncias químicas seria exemplo de um perigo. O consumo da água (exposição) pode levar à ocorrência de efeitos adversos na população consumidora,

significando o risco. A existência de exploração agrícola na bacia de contribuição do manancial, a descarga de esgotos sanitários ou efluentes de agroindústrias no manancial, falhas no tratamento da água e rupturas na rede de distribuição são exemplos de eventos perigosos, os quais podem introduzir perigos que podem estar associados a efeitos adversos na população consumidora.

O termo ‘risco potencial’ tem sido utilizado como sinônimo de ‘perigo’ (BASTOS *et al.*, 2003) e será por vezes empregado ao longo do presente texto.

Conforme mencionado anteriormente, ‘risco’ pode ser expresso como uma grandeza quantitativa e probabilística, por exemplo, por meio da metodologia conhecida como Avaliação Quantitativa de Risco (AQR). Segundo Bastos *et al.* (2009), essa metodologia é há algum tempo o paradigma central de estudos sobre danos à saúde decorrentes da exposição a substâncias químicas e, mais recentemente, tem sido adaptada à exposição a organismos patogênicos, constituindo hoje a principal base para a formulação de diretrizes e normas de qualidade da água para consumo humano.

Em sua forma clássica, a metodologia de AQR é composta por quatro etapas fundamentais, resumidas a seguir (FREITAS, 2002; BASTOS *et al.*, 2009):

a) Identificação do perigo: essa etapa compreende uma avaliação do conhecimento disponível e a descrição de efeitos adversos à saúde, crônicos ou agudos, associados a um determinado agente (físico, químico, microbiano), considerado um evento perigoso. A compreensão da origem do perigo e de como este pode ser introduzido na cadeia produtiva também integra essa etapa.

b) Avaliação da dose-resposta: avaliação do potencial que tem o agente de causar resposta em diversos níveis de exposição. Para determinados agentes, a definição da dose que causa efeito adverso é estabelecida a partir de estudos experimentais (com voluntários humanos ou, principalmente, em ensaios de laboratório com cobaias). Em outros casos, são utilizadas informações de estudos epidemiológicos.

c) Avaliação da exposição: compreende a caracterização da população exposta, a quantidade ingerida do agente, a frequência, a duração e as prováveis vias de exposição. No caso do consumo de água, envolveria o conhecimento ou estimativa

da qualidade da água, de um padrão de consumo de água (L/d) e da contribuição relativa do fator consumo de água frente a outras vias de exposição como, por exemplo, ar e alimentos.

d) Caracterização do risco: de posse das informações obtidas nas etapas anteriores, por meio de modelos matemáticos ou relações diretas entre a dose-resposta e exposição, pode-se estimar o risco associado ao perigo identificado.

É importante também registrar que o conceito de ‘risco tolerável’, que deve orientar o processo de tomada de decisão (incluindo aqui a definição de padrão de potabilidade), é algo permeado por fatores culturais, sociais, políticos e econômicos. Nesse sentido, Bernstein (1997) aponta que o ser humano moderno está mais preparado a conviver com riscos, devido o desenvolvimento de métodos para o seu gerenciamento. Hunter e Fewtrell (2001) sugerem que a definição do que seja risco tolerável pode se basear em avaliações do binômio risco/benefício, no entendimento de que, a aceitação do risco aumenta com a percepção dos benefícios da atividade que o gera. Por sua vez, Freitas (2002) pondera que “as decisões objetivando a redução de riscos se encontram mediadas por processos que envolvem simultaneamente as avaliações de riscos e a legitimação política”.

Por fim, cabe ainda o importante registro sobre o conceito de ‘percepção de risco’ (Mc DANIELS *et al.*, 1992), estreitamente associada às questões da comunicação de risco’ e de ‘risco aceitável’. De acordo com Castro *et al.* (2005), a confiança é a credibilidade que torna o risco menos perceptível e que ainda admite um nível de risco calculado. Segundo Hunter e Fewtrell (2001), dentre outros critérios, determinado nível de risco poderia ser considerado aceitável quando profissionais de saúde, responsáveis por formulação de políticas públicas e, ou o público em geral diz que é aceitável, ou principalmente no último caso, quando não diz que é inaceitável.

2.4 Qualidade da água para consumo humano

O padrão de potabilidade brasileiro é definido na Portaria nº. 518 do Ministério da Saúde de 25 de março de 2004, em termos de padrão microbiológico (incluindo padrão de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção), para substâncias químicas que representam risco à saúde, padrão de radioatividade e padrão de

aceitação para consumo humano (associadas a aspectos estéticos e organolépticos) (BRASIL, 2004).

Embora a Portaria MS nº. 518/2004 não explicita tal classificação, Bastos *et al.* (2001), sugerem que os parâmetros que compõem o padrão de potabilidade podem ser organizados, ao menos em termos de planos de amostragem, da seguinte forma: parâmetros operacionais (turbidez, cor, pH), sendo que a turbidez da água pós-filtração apresenta significado microbiológico; parâmetros bacteriológicos (coliformes e cloro residual), parâmetros de especial interesse para a saúde (fluoreto, cianotoxinas, trihalometanos), ‘demais parâmetros’ (incluindo todas as demais substâncias químicas e parâmetros de aceitação para consumo).

Ainda de acordo com Bastos *et al.* (2001), os planos de amostragem, em termos de frequência e número de amostras, concentram-se nos parâmetros ditos operacionais e microbiológicos (colimetria, turbidez, cor, cloro residual e pH), além do fluoreto. Ou seja, seriam estas as análises de ‘rotina’, as quais serão abordadas na presente dissertação.

A seguir são apresentadas, resumidamente, algumas características desses parâmetros e seus valores como padrão de potabilidade ou como recomendações de critérios de boas práticas, com ênfase no sistema de distribuição de água.

(i) Bactérias do grupo coliforme

Na Portaria MS nº. 518/2004 encontram-se as seguintes definições:

✓ coliformes totais (bactérias do grupo coliforme) - bacilos gram-negativos, aeróbios ou anaeróbios facultativos, não formadores de esporos, oxidase-negativos, capazes de desenvolver na presença de sais biliares ou agentes tensoativos que fermentam a lactose com produção de ácido, gás e aldeído a $35,0\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ em 24-48 horas, e que podem apresentar atividade da enzima β -galactosidase. A maioria das bactérias do grupo coliforme pertence aos gêneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* e *Enterobacter*, embora vários outros gêneros e espécies pertençam ao grupo.

✓ coliformes termotolerantes - subgrupo das bactérias do grupo coliforme que fermentam a lactose a $44,5\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ em 24 horas; tendo como principal representante a *Escherichia coli*, de origem exclusivamente fecal.

✓ *Escherichia coli* - bactéria do grupo coliforme que fermenta a lactose e manitol, com produção de ácido e gás a $44,5 \pm 0,2$ °C em 24 horas, produz indol a partir do triptofano, oxidase negativa, não hidroliza a uréia e apresenta atividade das enzimas β galactosidase e β glicoronidase, sendo considerada o mais específico indicador de contaminação fecal recente e de eventual presença de organismos patogênicos;

Segundo Bastos *et al.* (2000), o grupo dos coliformes totais (CT) inclui espécies de origem não exclusivamente fecal, podendo ocorrer naturalmente no solo, na água e em plantas; o subgrupo dos coliformes termotolerantes (previamente denominados coliformes fecais) também inclui bactérias de origem não exclusivamente fecal, embora em menores proporções que o grupo dos CT. Apesar disso, e com base no fato de que dentre os cerca de 10^6 - 10^8 coliformes fecais/100 mL usualmente presentes nos esgotos sanitários predominam a *Escherichia coli* (esta sim, uma bactéria de origem exclusivamente fecal), estes organismos ainda têm sido largamente utilizados como indicadores de poluição de águas naturais. Por outro lado, é pouco provável que os coliformes termotolerantes se desenvolvam em sistemas de distribuição, a menos que exista abundância de nutrientes, ocorra pós-contaminação, e, ou que não exista cloro residual livre e, por isto, ainda guardam certa credibilidade como indicadores da qualidade da água distribuída. Mesmo assim, o indicador mais preciso de contaminação da água será, sempre, a *E.coli*.

Portanto, ainda de acordo com os referidos autores, o isolamento de *E. coli* no sistema de distribuição é um sinal inequívoco de recontaminação fecal e, por medida de segurança, assim também deve ser interpretada a detecção de coliformes termotolerantes. Já o isolamento de coliformes totais, embora não guarde uma relação exclusiva com contaminação de origem fecal, serve como indicador da integridade do sistema de distribuição. Águas insuficientemente tratadas, sem a garantia de residual de cloro, ou infiltrações, podem permitir o acúmulo de sedimentos, matéria orgânica e promover o desenvolvimento de bactérias, incluindo aquelas do grupo coliforme que não *E. coli* ou termotolerantes. Por isso, na avaliação da qualidade da água distribuída, em geral, tolera-se a detecção eventual de coliformes totais (dentro de certo limite de frequência de detecção), mas requer-se a ausência sistemática de *E. coli* ou coliformes termotolerantes.

De acordo com a Portaria MS nº. 518/2004, em sistemas que analisam a água da população abastecida, 40 ou mais amostras por mês, os CT devem estar ausentes em 95% das amostras examinadas no mês; em sistemas que analisam menos de 40 amostras por mês apenas uma amostra poderá apresentar mensalmente resultado positivo (BRASIL, 2004).

(ii) Cloro residual livre

A manutenção de teores de cloro residual mínimos nos sistemas de distribuição visa à prevenção de recontaminação da água tratada. Após a aplicação do cloro na estação de tratamento para a desinfecção, o teor residual na saída do tanque de contato/entrada do sistema de distribuição, decai ao longo da rede de distribuição como resultado de fatores diversos (discutidos no tema seguinte). Portanto, a dosagem de cloro na estação de tratamento deve garantir a eficiência de desinfecção e a manutenção de residuais mínimos no sistema de distribuição.

Por outro lado, valores elevados de cloro da rede podem provocar desconfortos ao consumidor por problemas de gosto e odor. Na Tabela 1, estão resumidas as exigências e recomendações da Portaria MS nº. 518/2004 em termos de teores de cloro livre.

Tabela 1. Teores de cloro livre (mg/L) a serem mantidos em sistemas de abastecimento de água para consumo humano, Portaria MS nº. 518/2004.

Local	Mínimo obrigatório	Máximo	
		Obrigatório	Recomendado
Saída do tanque de contato	0,5 ⁽¹⁾	-	-
Sistema de distribuição	0,2 ⁽²⁾	5,0 ⁽³⁾	2,0 ⁽⁴⁾

(1) Indicador da eficiência da desinfecção; (2) prevenção de contaminação; (3) critério de saúde;

(4) critério organoléptico. Fonte: Bastos *et al.* (2005).

(iii) Turbidez

A turbidez é uma característica da água devido à presença de partículas em estado coloidal, em suspensão, matéria orgânica e inorgânica finalmente dividida, plâncton e outros organismos microscópicos. Simplificadamente, a turbidez expressa a transparência da água. Valores de turbidez em torno de 8 uT ou menos são imperceptíveis visualmente (BASTOS *et al.*, 2007b).

Na água distribuída a turbidez informa sobre a estanqueidade do sistema de distribuição, sendo que a elevação da turbidez pode indicar infiltrações na rede e riscos de contaminação. No ponto de consumo a turbidez assume também importância estética e organoléptica, podendo provocar rejeição por parte do consumidor. O padrão de turbidez para água distribuída (como padrão de aceitação para consumo) é de 5,0 uT (BRASIL, 2004).

(iv) **pH (potencial hidrogeniônico)**

O pH é a medida da atividade dos íons hidrogênio e expressa a intensidade de condições ácidas ($\text{pH} < 7,0$) ou alcalinas ($\text{pH} > 7,0$). Como o pH é expresso em escala logarítmica, ao incremento e decréscimo de uma unidade de pH correspondem, respectivamente, aumento de dez vezes em alcalinidade e acidez. Baixos valores de pH podem contribuir para a corrosão das instalações de sistemas de abastecimento e prediais. Em contrapartida valores elevados aumentam a possibilidade de incrustações. A faixa de valores recomendada é de 6,0 a 9,5.

(v) **Cor aparente**

A cor da água é devida à presença de substâncias dissolvidas, decorrentes da decomposição de matéria orgânica (plâncton, substâncias húmicas), da presença de substâncias tais como ferro e manganês, ou da introdução de contaminantes, por exemplo, efluentes industriais. Quando a determinação da cor é realizada após centrifugação ou filtração da amostra para se eliminar a interferência de partículas coloidais e suspensas, obtém-se a cor verdadeira. Caso contrário tem-se a cor aparente.

Cor é um parâmetro essencialmente de natureza estética, e o VMP é de 15 uH. Entretanto, a cor devida a substâncias orgânicas pode indicar a presença de precursores de formação de trihalometanos, um subproduto tóxico da cloração. Cor elevada no sistema de distribuição pode ainda contribuir para o consumo do cloro residual (BASTOS *et al.*, 2007b).

(vi) **Fluoreto**

O flúor é adicionado à água ao final do tratamento, como obrigação legal – Portaria nº 635/BSB/1975 (BRASIL, 1975) como medida de prevenção à cárie

dentária. Entretanto, flúor em excesso é prejudicial à saúde podendo favorecer o desenvolvimento de fluorose dentária e em valores mais elevados fluorose óssea.

Na Tabela 2, encontram-se os valores de íon fluoreto a serem mantidos na água após a fluoretação. O VMP estabelecido na Portaria MS nº. 518/2004 para fluoreto (1,5 mg/L) refere-se à concentração máxima a ser observada na água (por ocorrência natural e, ou, adição de flúor), desde o ponto de vista de proteção à saúde, sendo em geral superior aos limites estabelecidos na legislação sobre fluoretação da água com o propósito de prevenção de cáries. Na prática da fluoretação deve ser observado o disposto na Portaria nº 635/BSB/1975 (Tabela 2), mas qualquer situação deve ser atendido o VMP estabelecido na Portaria MS nº. 518/2004 (BASTOS *et al.*, 2005).

Tabela 2. Limites recomendados para íon fluoreto, Portaria nº635/BSB/1975 (mg/L).

Médias das temperaturas máximas do ar (°C)	Mínimo	Máximo	Ótimo
10,0 - 12,1	0,9	1,7	1,2
12,2 - 14,6	0,8	1,5	1,1
14,7 - 17,7	0,8	1,3	1,0
17,8 - 21,4	0,7	1,2	0,9
21,5 - 26,8	0,7	1,0	0,8
26,8 - 32,5	0,6	0,8	0,7

Fonte: Bastos *et al.* (2005).

2.5 Índice da Qualidade da Água

Conforme Gastaldini e Souza (1994), os índices da qualidade da água (IQA) foram sugeridos com a intenção de se concentrarem os parâmetros analisados em um único valor, com a possibilidade de análise da evolução da qualidade da água no tempo e no espaço.

O emprego de tais índices apresenta, entretanto, vantagem e limitações. A vantagem está na facilidade e praticidade da interpretação das variáveis em um único número, pelo público leigo. A principal limitação se restringe na perda de interpretação das variáveis individuais e da relação destas com as demais.

O índice é determinado através da equação:

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

Onde:

IQA = índice da qualidade da água é representado por um número em escala contínua de 0 a 100.

q_i = qualidade individual (sub-índice de qualidade) do i -ésimo parâmetro, um valor entre 0 e 100.

w_i = peso unitário do i -ésimo parâmetro.

n = número de parâmetros.

Na Tabela 3, está exemplificada a avaliação e classificação da qualidade da água para os valores obtidos no IQA, variados numa escala de 0 a 100.

Tabela 3. Classificação da qualidade da água de acordo com o IQA utilizado.

Valor	Qualificação
$IQA > 90$	Ótima
$70 < IQA < 90$	Boa
$50 < IQA < 70$	Ruim
$IQA < 50$	Péssimo

Os parâmetros do índice da qualidade da água descritos por Brown *et al.* (1970), são baseados nos padrões Norte Americanos da *National Sanitation Foundation* (NSF). A determinação segundo o NSF é obtida pelo produto ponderado correspondente a nove parâmetros, a saber:

- 1) Temperatura da água;
- 2) Potencial hidrogênico (pH);
- 3) Oxigênio dissolvido;
- 4) Demanda bioquímica de oxigênio;
- 5) Coliformes termotolerantes;

- 6) Nitrogênio total;
- 7) Fósforo total;
- 8) Sólidos totais
- 9) Turbidez.

2.6 Perigos potenciais em redes de distribuição de água

Em sistemas de distribuição a qualidade da água para o consumo humano está sujeita há várias interferências, tanto no tempo quanto no espaço, decorrentes de situações tais como: vulnerabilidades nos reservatórios de distribuição, vazamentos e rupturas nas canalizações, corrosão das tubulações, intermitência do abastecimento, subpressões e infiltrações, insuficiência de residuais desinfetantes (AINSWORTH, 2004).

A pressão na rede exerce papel fundamental no abastecimento de água e em sua qualidade. Pressões mínimas visam garantir a continuidade do abastecimento domiciliar. A intermitência do abastecimento de água acarreta redução de pressão ou pressão negativa na rede, o que por sua vez pode favorecer infiltrações e contaminação da água. Por outro lado, pressões excessivas podem provocar perdas de água e mesmo ruptura das tubulações.

A Portaria MS nº. 518/2004 estabelece que “em todos os momentos e em toda sua extensão, a rede de distribuição de água deve ser operada com pressão superior à atmosférica” (BRASIL, 2004). A norma da ABNT para projeto de rede de distribuição de água estabelece como critério de projeto pressões entre 10 mca (pressão dinâmica mínima) e 50 mca (pressão estática máxima) (ABNT, 1994).

Como já referido, o teor de cloro residual nos sistemas de distribuição de água tende a cair, em decorrência de um ou mais dos seguintes fatores: reações com diversas espécies orgânicas e inorgânicas presentes na água transportada (decaimento na água) ou na interface com os elementos físicos do sistema, particularmente as tubulações (decaimento de parede), e perda para a atmosfera através de superfícies livres (por exemplo, em reservatórios de distribuição). Dentre os fatores que influenciam o decaimento na água encontram-se a dose de cloro aplicada na ETA, a

presença de substâncias (orgânicas e inorgânicas) oxidáveis, o pH e a temperatura da água; em relação ao decaimento de parede podem ser citados: o material e a idade das tubulações e a presença de biofilme. O decaimento dos teores de cloro pode ainda ser favorecido em regiões onde a água apresente maior tempo de residência, como as localizadas em extremidades da rede ou em zonas com baixo consumo (VIEIRA *et al.*, 2001).

Enfim, seja qual for a causa ('eventos perigosos' ou 'situações perigosas', como, por exemplo, intermitência de abastecimento, pressurização inadequada, idade das tubulações), a deterioração da qualidade da água na rede de distribuição e a violação dos limites estabelecidos como padrão de potabilidade (ou recomendação como critério de qualidade) devem ser entendidas como manifestação explícita de perigos.

Adicionalmente, registros de queixas de consumidores também poderiam ser interpretados como 'eventos perigosos' (ou talvez 'eventos sentinela'), uma vez que podem estar associados a reclamações explícitas sobre a qualidade da água, ou indiretas, tais como queixas sobre intermitência de abastecimento. A mesma leitura poderia ser feita em relação a ordens de serviços de manutenção na rede, pois, recorrências de problemas em determinado ponto ou região da rede podem refletir pontos vulneráveis, além do que, em tese, todo serviço de reparo expõe o sistema à possibilidade de contaminação.

2.7 Modelo de Simulação Computacional de Hidráulica - EPANET

Neste trabalho o EPANET foi o sistema computacional de hidráulica utilizado para a obtenção dos dados de pressão na rede de abastecimento de água. Trata-se de um *software* de domínio público desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), muito empregado no gerenciamento dos sistemas de distribuição de água potável (ROSSMAN *et al.*, 2000).

O EPANET é um programa computacional que permite a execução de simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e da qualidade da água na rede de abastecimento em pressão (ROSSMAN *et al.*, 2000).

Na simulação dinâmica exige-se que seja criado um padrão temporal, para a representação da variação periódica dos consumos ao longo do tempo (dia); o mesmo não ocorre para a simulação estática.

O EPANET incorpora um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica (ROSSMAN *et al.*, 2000), descritos a seguir:

- ✓ Dimensão da rede é ilimitada (o número de componentes para a análise pode variar);
- ✓ Cálculo da perda de carga hidráulica é realizado por uma das fórmulas: Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Chezy-Manning;
- ✓ Modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas reguladoras de pressão e de fluxo;
- ✓ Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- ✓ Múltiplas categorias de consumo nos Nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- ✓ Modelagem da relação entre pressão e fluxo efluente de dispositivos emissores (consumos dependentes da pressão);
- ✓ Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (altura de água em um reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

Como procedência de uma simulação bem sucedida deve ser verificado quais dados de entrada são necessários e indispensáveis para o processo da simulação.

O EPANET permite que os dados da simulação sejam comparados com os valores reais (campo), através do relatório de calibração. Como resposta pode ser verificada a estatística (média, erro médio e desvio padrão), o gráfico de correlação e o gráfico de comparação de valores médios. Todas as alternativas relacionam os dados observados e os computados (simulados).

Na Figura 2, encontram-se ilustrados os componentes físicos da rede, os quais estão disponíveis no modelo EPANET: trechos (representam as tubulações), bombas e válvulas de controles, os Nós, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV). Nesses componentes são introduzidas informações da rede como o nível de água dos reservatórios, diâmetro e coeficiente de rugosidade das tubulações, valor da curva da bomba, diâmetro, tipo e parâmetro de controle para as válvulas, etc.

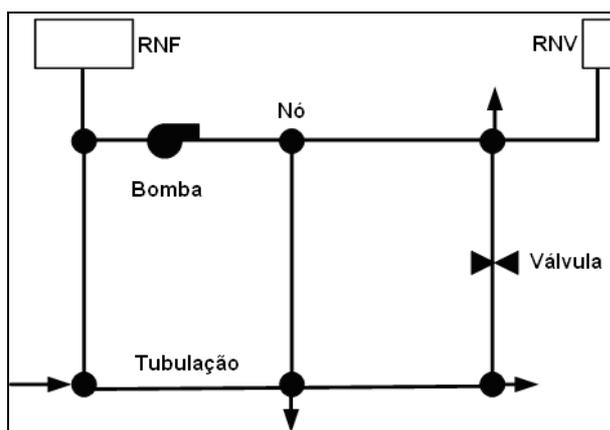


Figura 2. Componentes físicos do EPANET
(Fonte: Rossman *et al.*, 2000, adaptado).

Os Nós são os pontos da rede onde as tubulações são conectadas entre si. Dentre as propriedades dos Nós estão as coordenadas geográficas, a cota e o ‘consumo-base’, que se refere ao valor médio do consumo de água, caso não seja informado assume-se como nulo.

Os RNF são Nós que descrevem a capacidade de armazenamento de água, de valor ilimitado e carga hidráulica constante. Podem ser utilizados na simulação de lagos, rios ou aquíferos e podem servir também como pontos de origem na análise da qualidade da água. O parâmetro a ser inserido é o nível de água e caso seja pretendido simular a qualidade da água deve ser informada a qualidade inicial. Já os RNV possuem capacidade de armazenamento limitada, com possíveis ocorrências de variação do volume de água com o tempo, durante a simulação.

As bombas são trechos que transferem energia para o escoamento e aumentam a carga hidráulica. Podem ser ligadas e desligadas em diferentes momentos, quando o nível no RNV ou a pressão em um Nó atinge valores-limite pré-determinados, através da utilização de controles e padrões temporais.

As válvulas controlam a pressão e o escoamento em algum ponto na rede. São propriedades da tubulação e podem estar abertas ou fechadas.

As tubulações são trechos que transportam água entre vários pontos da rede. O modelo EPANET considera que o escoamento ocorre em pressão em todas as tubulações, dos pontos com carga hidráulica mais elevada para os pontos com carga mais baixa. As tubulações podem ser abertas ou fechadas em determinados períodos da simulação ou em condições específicas de operação, na condição da altura de água no reservatório de nível variável atingir determinados valores ou quando a pressão no Nó apresentar resultados abaixo ou acima de certo valor.

O padrão temporal é um componente não-físico, originado de um conjunto de fatores multiplicativos aplicados ao valor de uma determinada grandeza, que demonstra sua variação no tempo. O consumo no Nó, a carga hidráulica nos reservatórios de nível fixo, os esquemas de bombeamento e a entrada de um parâmetro de qualidade da água na rede podem ser associados a um padrão temporal. O período de tempo assume valor fixo e constante, e o número utilizado neste período pode variar.

2.8 Sistemas de Informações Geográficas

Por se tratar de uma tecnologia em constante desenvolvimento, múltiplas definições são encontradas para o Sistema de Informações Geográficas (SIG). Sendo assim, SIG é contextualizado em sua grande maioria como uma ferramenta de coleta, armazenamento, manipulação e exposição de dados do mundo real (BURROUGH, 1986). Consiste em uma ferramenta tecnológica com capacidade para análise e planejamento espacial, realizadas de maneira automatizada.

Aronoff (1989) define SIG como um “*conjunto de aplicações manuais ou digitais, capazes de realizar o armazenamento e manipulação de dados referenciados geograficamente*”. Desta forma, SIG pode ser descrito como um sistema destinado ao tratamento de dados referenciados espacialmente.

A operacionalidade do conjunto de características vinculadas ao Sistema de Informações Geográficas só foi possível devido ao grande avanço tecnológico,

principalmente, da cartografia digital e dos sistemas de gerenciamento de banco de dados.

As mudanças ocorridas na ciência cartográfica possibilitaram a transição dos mapas analógicos para o meio digital, através do auxílio de *softwares* como o CAD (*Computer Aided Design*), o CAM (*Computer Aided Mapping*) e AM/FM (*Automated Mapping/Facility Management*).

A vantagem do SIG em relação aos sistemas de informações convencionais está na sua capacidade de associar dados alfanuméricos com os elementos gráficos (QUEIROZ e FERREIRA, 2006). Esta relação permite que as informações descritivas, da representação espacial, sejam consultadas por analistas/usuários de uma maneira simples e prática.

Nesta abordagem cabe mencionar que a importância dos dados geográficos não está apenas na sua espacialização/localização, mas também na exploração destes dados. Um exemplo típico é quando se responde às perguntas comuns “onde está...?”, “por onde ir...?”, “o que pode acontecer se...?”

Este tipo de análise espacial tem auxiliado vários campos de pesquisas, dentre eles se destacam aqueles que representam os processos dinâmicos tanto físicos (geologia, geomorfologia, climáticos, impactos ambientais) como sociais (dinâmica populacional, segurança pública). Assim, Burrough (1986) define a modelagem dinâmica como a “*representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionadas*”.

Um dos desafios futuros para o SIG está na busca da representação dinâmica dos dados, momento em que deixará de ser apenas um sistema estático, para reproduzir de maneira realista os processos espaço-temporais (PEDROSA, 2001).

Na Figura 3, encontram-se representados os elementos básicos de um SIG de maneira hierárquica. A princípio a *interface homem e máquina* determina a operacionalidade e controle do sistema. A *entrada, edição, análise, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização, plotagem, armazenamento, recuperação e saída dos dados* são elementos comuns e muitos deles indispensáveis a qualquer Sistema de Informação Geográfica. O Sistema Gerenciador de Banco de

Dados (SGBD) e a arquitetura dual (georrelacional) são os modelos mais utilizados na representação alfanumérica (CÂMARA, *et al.*, 2004).

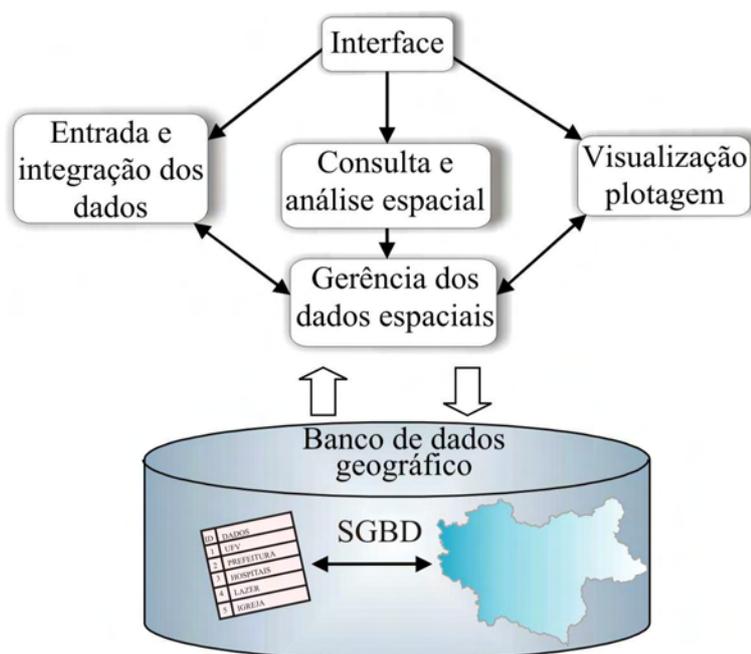


Figura 3. Arquitetura de SIG
(Fonte: Câmara *et al.*, 2004, adaptado).

Os mapas podem ser representados computacionalmente de duas maneiras: por estruturas de dados vetoriais ou matriciais. Na estrutura vetorial são considerados três elementos gráficos: pontos, linhas e polígonos, definidos em qualquer sistema de coordenada. Já a matricial estabelece o espaço como uma superfície plana, onde cada pixel associa-se a uma porção do terreno (CÂMARA e MEDEIROS, 1998).

De acordo com Rosa (2003), estas estruturas são diferenciadas conforme o modelo de espaço. As representações vetoriais são derivadas de um espaço contínuo, permitindo desta maneira que todas as posições, distâncias e áreas apresentem alto grau de precisão, ou seja, assume-se que as coordenadas dos pontos são matematicamente exatas. Em outro viés está a estrutura matricial, considerada discreta, característica que pode causar interferência na avaliação de áreas e distâncias.

A escolha de uma das estruturas depende do tipo de trabalho a ser executado, quando no estudo o objetivo é retratar a distribuição espacial de objetos, análise de rede e estabelecer relacionamentos espaciais, a mais indicada é a estrutura vetorial,

sendo a matricial apropriada para o estudo da variabilidade espacial de um fenômeno, do tipo ambiental (PINA, 2000).

Como observado, SIG é aplicado para as mais diversas áreas, porém, sua utilização não deve ser entendida apenas como uma ferramenta capaz de relacionar diferentes tipos de informações em um único banco de dados. Antes é necessária a análise, exploração conceitual do que será representado, para então dar sequência aos procedimentos que irão garantir o uso adequado.

Desta forma, Câmara *et al.* (2004) sugerem a compreensão da distribuição espacial dos fenômenos ocorridos no espaço geográfico para esclarecimento de questões centrais nos diversos campos de pesquisa. Como exemplificado no estudo de caso da epidemiologia: *A distribuição dos casos de uma doença forma um padrão no espaço? Existe associação com alguma fonte de poluição? Evidência de contágio? Variou no tempo?*

Esta “compreensão” transforma conceitos específicos em representações computacionais, o que torna acessível a ferramenta SIG.

No campo específico do tema de interesse desta dissertação é importante o registro histórico do trabalho do médico inglês John Snow sobre o mapeamento de casos de cólera em Londres século XIX, considerado como uma análise geográfica própria do SIG. A ocorrência de uma epidemia levou John Snow a mapear os casos de mortes, relacioná-los com o consumo de água e interditar bombas d’água (CÂMARA *et al.*, 2004).

Outro exemplo, agora contemporâneo, é o do projeto SIG-Fiocruz. Barcellos *et al.* (1998) inter-relacionaram dados ambientais e sócio-demográficos para análise de risco de contaminação da água no sistema de abastecimento de água em microáreas do município do Rio de Janeiro. As camadas de informações utilizadas foram os dados censitários (IBGE), representação da rede de água (mananciais e reservatórios) e dados da qualidade da água (concentração de cloro, fluoreto, pH, turbidez, coliformes totais e fecais). A técnica identificada como área de influência (*buffers*), possibilitou estabelecer áreas de risco de acordo com cada critério e, como resultados obtiveram-se a localização e quantificação populacional expostas aos riscos associados ao abastecimento de água.

2.9 Relação do Modelo de Simulação Computacional de Hidráulica e SIG

A relação do Modelo de Simulação Computacional de Hidráulica (MSCH) e SIG constitui ferramentas de otimização para a gestão operacional da rede, por serem programas computacionais indicados na realização de atividades condizentes com a realidade.

Um dos objetivos desta relação é a utilização da base de dados representada no SIG pelo MSCH. Este processo pode diminuir a geração de erros no momento da representação da rede de distribuição de água no modelo de simulação. Covas *et al.* (2008) alertam para os cuidados do traçado da rede no SIG, quando a finalidade futura é a simulação hidráulica, para que não ocorra a incompatibilidade de dados. Os resultados obtidos pelos MSCH também podem ser analisados no SIG.

Para Moura (2001), a relação SIG e MSCH é possível mesmo que a compatibilidade dos dados apresente diferentes níveis de dificuldades como a representação topológica dos sistemas hidráulicos, a conversão, exportação e importação dos dados.

Na visão de Feinberg e Uhrick (1997), o SIG consegue estabelecer uma conexão comum entre diferentes tipos de informações. Moura (2001) discute a conexão da rede no SIG através da infraestrutura do sistema hidráulico, como mostra a Figura 4.

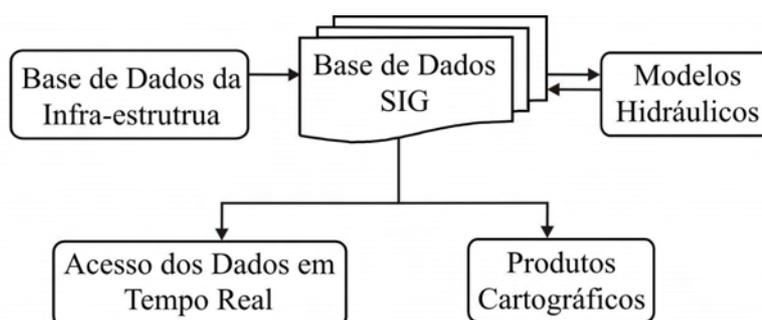


Figura 4. Integração SIG-MSCH

(Fonte: Moura, 2001).

O compartilhamento da base de dados do SIG com o EPANET e vice-versa pode ser realizado através da utilização dos conversores shp2epa e epa2GIS, disponíveis gratuitamente na internet.

2.10 Métodos de estimativa pontual

O método de estimativa pontual tem como finalidade estimar valores para pontos não amostrados, com base nos valores pontuais amostrados e conseqüentemente na geração de mapas. O princípio da Primeira Lei da Geografia considera para a análise de um determinado espaço físico que locais mais próximos entre si sejam mais parecidos do que locais mais afastados (TOBLER, 1979).

Neste sentido alguns interpoladores foram desenvolvidos, como o método da Ponderação pelo Inverso da Distância, apresentado na Figura 5, que estabelece maior similaridade entre os pontos mais próximos. Desta maneira, a influência de um ponto amostrado em relação ao ponto a ser estimado é inversamente proporcional à distância. Maiores pesos implica uma maior influência do valor vizinho conhecido (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

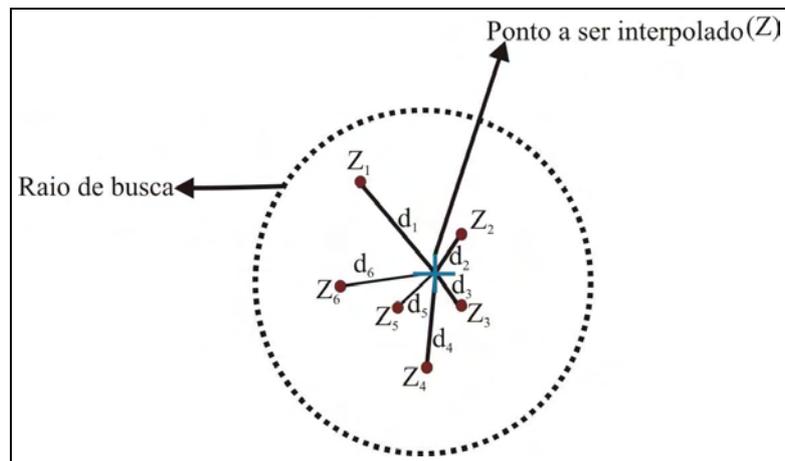


Figura 5. Interpolação IDW
(Fonte: Grohmann, 2008, adaptado).

A estimativa é obtida de acordo com a Equação 2:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Em que:

⇒ Z Ponto não amostrado.

$$\Rightarrow z_i \quad \text{Ponto amostrado.}$$

$$\Rightarrow w_i = \frac{1}{d_i^p} \left\{ \begin{array}{l} w_i = \text{Peso.} \\ d_i = \text{Distância entre os pontos amostrados e os não amostrados.} \\ p = \text{Potência.} \end{array} \right.$$

Em síntese, sobre os métodos de estimativa pontual em áreas de risco envolvendo a qualidade da água, Nobre (2006) propôs uma metodologia para avaliação do risco de contaminação de solo e águas na região metropolitana de Maceió-AL, através da modelagem hidrológica conceitual e técnicas do Geoprocessamento (SIG). O mapeamento da qualidade da água foi realizado através dos dados de cloreto (cl), nitrato (NO₃) e do Índice de Qualidade da Água Subterrânea (IQAS). Constatou-se através das técnicas de interpolação da krigagem geoestatística, que os valores elevados do IQAS, estavam associados às áreas de maior vulnerabilidade do aquífero.

Como mencionado a interpolação é um método para a estimativa dos valores pontuais sem informação, com base nas amostras coletadas em campo. Não existe um método que seja considerado ‘ideal’, a importância de cada um deles depende do tipo de estudo a ser desenvolvido. Assim, a aplicabilidade dos interpoladores relaciona-se a cada caso em particular, estando sujeitos a produzir bons resultados, como também os indesejados.

2.11 Análise Multicritério

As técnicas de análise multicritério como suporte no processo de tomada de decisão, envolvendo problemas de caráter espacial, tiveram início com aplicações no domínio da Geografia, a partir dos anos 90 com o surgimento das correntes MC-SDSS (*MultiCriteria Spatial Decision Support Systems*) e Gis-MCDA (*Gis-based MultiCriteria Decision Analysis*). Os temas abordados são diversos, relacionados ao meio ambiente, planejamentos urbanos e regionais, gestões industrial, turística e lazer, dentre outras (SILVA, 2007).

O processo decisório é fundamentalmente governado por escolhas entre alternativas. As alternativas representam diferentes hipóteses, ações ou características, entre indivíduos considerados na tomada de decisão.

Critérios caracterizam-se como elementos informacionais que podem ser medidos e avaliados, para encontrar melhores alternativas num processo decisório. Geralmente critérios podem ser considerados como fatores ou restrições. Fatores são critérios de caráter contínuo, empregados para aumentar ou reduzir a adequabilidade considerada e restrições são critérios considerados como limite/barreira absoluta às alternativas. No entanto, os critérios são atributos, indicadores que permitem comparar alternativas de acordo com um eixo particularmente significativo ou de um ponto de vista.

A análise multicritério dispõe de um conjunto de técnicas e procedimentos aplicados para auxiliar ou apoiar o processo de tomada de decisão, entre uma multiplicidade de critérios.

A análise multicritério consiste em uma metodologia de análise de grande potencial, pois fornece subsídios à tomada de decisão através da comparação entre temas de grandezas variáveis que de outra maneira não seria possível. Para proceder com a aplicação da análise multicritérios entre temas diversificados, suas escalas de valores naturais devem ser re-escaladas para uma mesma escala.

Uma vez que os critérios estejam compatibilizados à comparação, a estratégia seguinte é estabelecer o grau de importância relativa de cada um na análise. Para isso, a técnica de comparação pelo Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchy Process* - AHP) permite estabelecer pesos a cada fator segundo sua relevância.

Em sequência pode-se adotar diferentes técnicas para avaliar e combinar os critérios re-escalados. Dentre elas, as mais comuns são a Combinação Linear Ponderada (*Weight Linear Combination* - WLC), a Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Average* - OWA) ou ainda o Método de Interseção Booleana.

A análise multicritério envolve situações a serem analisadas sob a ótica de decisões, as quais se baseiam na escolha de alternativas como forma de propor soluções para os problemas estudados. Desta maneira, a abordagem dos elementos decisórios torna-se importante (NEIVA, 2006):

✓ **Analista:** é o consultor, profissional (cientista ou técnico), com a função de analisar o problema e auxiliar na tomada de decisão, através de orientações sobre as alternativas viáveis.

✓ **Decisor:** é o indivíduo ou um grupo de indivíduos envolvidos no processo de decisão, conhecidos como interventores. São os responsáveis pela tomada de decisão, através da manifestação das preferências e julgamento de valor fornecido em distintas fases do processo.

✓ **Critério:** é uma propriedade ou variável a ser avaliada, permite que seja realizada uma análise de preferências entre as ações.

✓ **Alternativa viável:** é a estratégia adotada pelo decisor.

✓ **Atributo:** é uma medida (valor) que possibilita avaliar os níveis de vários objetivos alcançados ou não, dada uma decisão particular.

✓ **Cenário:** aborda o espaço natural, podendo ser projetado para o futuro (predição).

2.11.1 Estudo dos Critérios / Pesos

Os critérios são informações que permitem a comparação das ações em relação a diferentes “pontos de vista”. Cada um desempenha um papel diferente e conseqüentemente a importância entre eles não é a mesma, sendo assim, aqueles considerados mais relevantes recebem maior peso na análise multicritério (PEREIRA, 2003).

Segundo Ferreira *et al.* (2004), a origem dos critérios pode ocorrer de duas maneiras, por fatores ou restrição. Os fatores são de caráter contínuo, limite relativo e a restrição considerada como limite/barreira absoluta às alternativas.

Os critérios do tipo booleano simples são representados por duas classes: as aptas, associadas ao atributo “1”, indicam existir aptidão para as possíveis alternativas; e as não-aptas, ao valor “0”, contradizem a definição de aptas. Estabelece por vez, que todos os critérios têm a mesma importância, o que muitas vezes não

corresponde à realidade, pois a importância de alguns pode ser maior que a de outros na determinação da adequabilidade de uma área.

Os critérios tidos como fatores são re-escalados para uma escala contínua correspondente ao grau de pertinência entre 0 e 1. A região imprópria corresponde ao valor 0 e a de maior potencial dentre as demais para a solução, a 1.

A definição de importância dos critérios é realizada com a finalidade de estabelecer a normalização dos pesos. Saaty (1980) define comparações par a par entre os critérios que interferem em um problema, apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4. Escala de comparação de critérios.

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Pouco mais importante	Um critério é um pouco mais importante que o outro, ou seja, constitui importância moderada.
5	Muito mais importante	Um critério é muito mais importante que o outro
7	Bastante mais importante	Critério é fortemente favorecido e sua importância foi demonstrada.
9	Extremamente mais importante	Critério de maior ordem de extrema importância para o objeto
2, 4, 6, 8 Valores recíprocos dos anteriores	Valores intermediários	Valores intermediários entre julgamentos – possibilidades adicionais

Fonte: Saaty (1980).

Tabela 5. Escala de comparações de critérios.

ESCALA								
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				

Após a definição dos critérios e da comparação para cada combinação de fatores, é viável determinar um conjunto bem sucedido de pesos que possam ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas. O peso atribuído aos critérios é determinado segundo a importância de um em relação ao outro.

2.11.2 Re-escalamento dos Critérios

Um dos procedimentos obrigatórios para a aplicação da técnica de análise multicritério é o re-escalamento dos critérios para um intervalo comum, pois na sua maioria, os valores não costumam ser compatíveis entre si, o que inviabiliza serem associados.

O re-escalamento consiste no processo de transformação dos valores dos dados originais em graus de pertinência, variando de acordo com os níveis de adequabilidade em um intervalo contínuo entre 0 a 1.

Na análise em termos de adequabilidade, as informações são consideradas fatores, que permite caracterizar o grau de aptidão para todas as regiões geográficas.

Um dos métodos mais empregados para o re-escalamento dos critérios é a lógica *Fuzzy*, apresentada em 1965 por Zadeh. A lógica *Fuzzy* se baseia no princípio da variabilidade em grau de verdade de 0 a 1, o que torna algo ser parcialmente verdadeiro ou parcialmente falso. O que fato se desvincula da abordagem da lógica Booleana de dois extremos fixos: verdadeiro ou falso.

2.11.3 Exploração das ferramentas SIG na análise multicritério

Nesta dissertação a aplicação da análise multicritério será realizada através das ferramentas disponíveis no *software* Idrisi, por este motivo se julgou relevante sua abordagem. O estudo apresentado está fundamentado em Eastman (2006).

Na Figura 6, podem ser verificados os procedimentos a serem realizados para a obtenção do mapa com a aplicação da análise multicritério no *software* Idrisi.

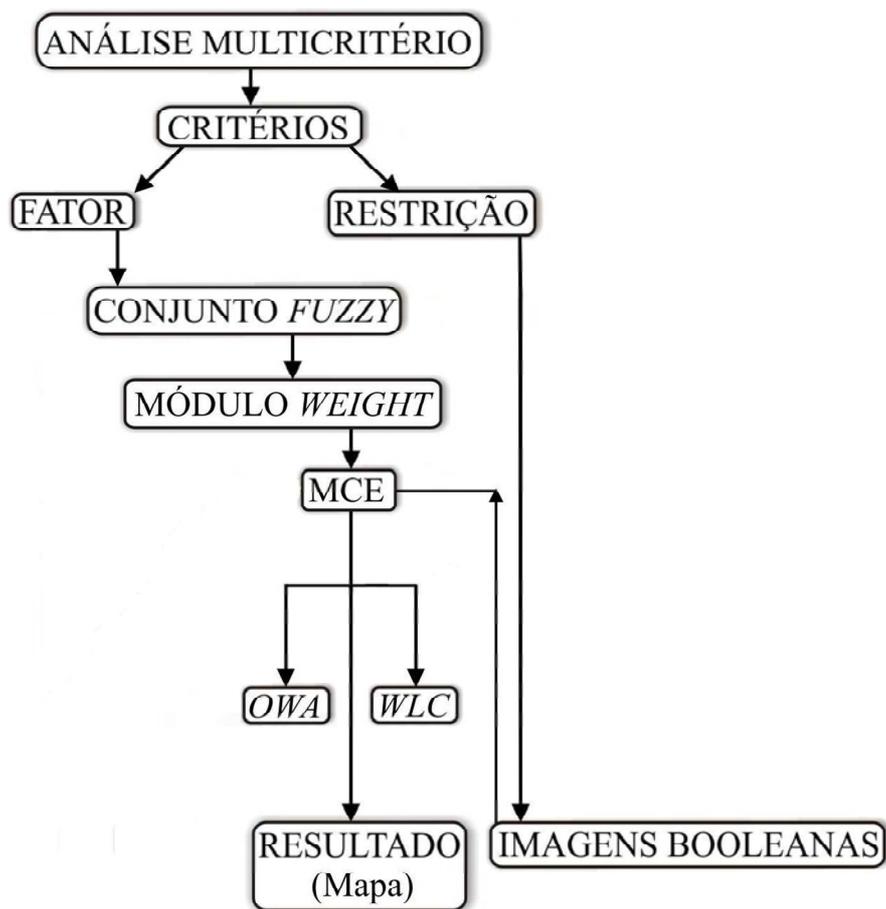


Figura 6. Sequência operacional da análise multicritério no software IDRISI.

No Idrisi o módulo MCE (*Multi Criteria Evaluation*) é uma ferramenta de apoio à decisão para a avaliação de multicritérios. O MCE disponibiliza recursos para avaliar e combinar um conjunto de critérios por decisões, com a finalidade de gerar um único resultado (mapa), de acordo com o objetivo específico.

O MCE trabalha com três técnicas diferentes, a Combinação Linear Ponderada (WLC - *Weighted Linear Combination*), a Média Ponderada Ordenada (OWA - *Ordered Weighted Average*) e os Métodos de Interseção Booleana. As duas primeiras técnicas são re-escaloadas através do módulo *Fuzzy*.

O módulo *Fuzzy* é uma ferramenta apropriada para o re-escalamento dos critérios com base na lógica *Fuzzy*, descrita anteriormente. A operacionalidade de re-escalamento é realizada através das funções membros *Sigmoidal*, *J-Shaped*, *Linear* e a definida pelo usuário, cuja estrutura representativa são gráficos. O grau de adequabilidade se encontra no eixo y e as posições dos pontos (a, b, c e d), no eixo x, indicam o formato da curva, se crescente, decrescente ou simétrica, dependendo de

cada caso analisado quanto ao risco. Na Figura 7 encontra-se ilustrado a função membro *Sigmoidal monotônica* crescente e decrescente.

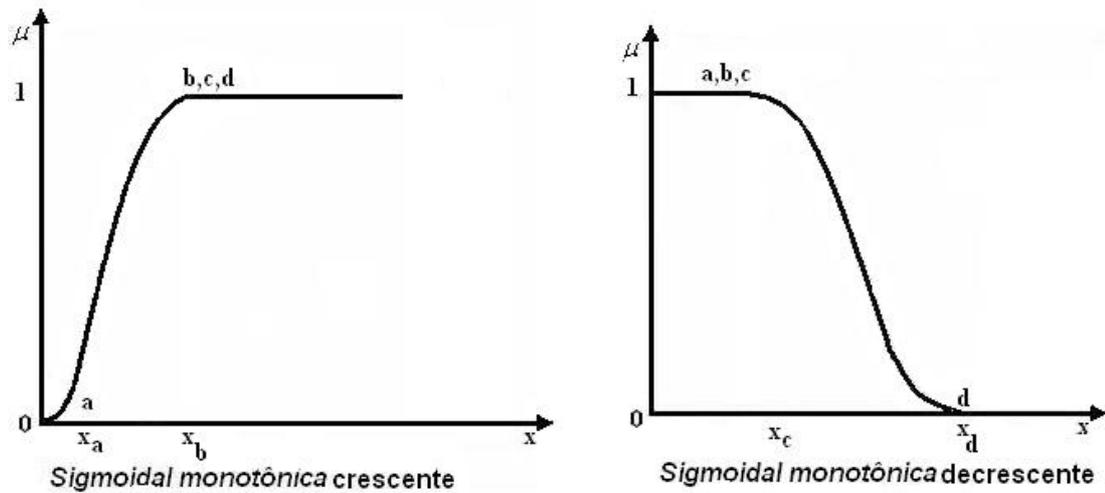


Figura 7. Gráficos da função *Sigmoidal monotônica* crescente e decrescente.

(Fonte: Lima *et al.*, 2009, adaptado).

Para a função *sigmoidal* utiliza-se a Equação 3:

$$\mu = \cos^2 \alpha \quad (3)$$

Onde, no caso de uma:

função *sigmoidal* crescente:

$$\alpha = \frac{1 - (x - x_a)}{x_b - x_a} \cdot \frac{\pi}{2}$$

para:

$$x < x_a, \mu = 0; \quad x > x_b, \mu = 1$$

função *sigmoidal* decrescente:

$$\alpha = \frac{1 - (x - x_c)}{x_d - x_c} \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$x > x_d, \mu = 0; \quad x < x_c, \mu = 1$$

O módulo *Weight* é uma técnica utilizada para desenvolver um conjunto de pesos relativos a um grupo de fatores. Os pesos são desenvolvidos por uma série de comparação de pares, de importância relativa entre cada um deles, à adequabilidade do objetivo que está sendo avaliado. Estas comparações de pares são analisadas e resultam em um conjunto de pesos que somam um. Os fatores e seus pesos resultantes são usados no módulo MCE aplicados através das técnicas WLC e OWA.

A técnica WLC proporciona a compensação total dos fatores envolvidos, uma vez que é dada uma equidistribuição de pesos aos mesmos. Em uma análise WLC, o risco é considerado “risco médio” na área estratégia de decisão.

O método OWA é semelhante à técnica WLC quanto ao re-escalamento e à compensação dos pesos, porém, a distribuição dos pesos ocorre de maneira ordenada. Pesos ordenados possibilitam maior controle sobre o nível global de compensação entre fatores, isto é, no grau de influência dos pesos, assim como, maior controle do nível de risco na determinação da aptidão.

No Método de Interseção Booleana os critérios são re-escalados em imagens Booleanas, associando áreas aptas ao valor 1 e áreas não aptas ao valor 0. Insere-se a combinação de operação AND (mínimo), bastante conservadora em termos de risco, pois o resultado adequado é obtido satisfazendo a todos os critérios (CALIJURI e LORENTZ, 2003).

3. METÓDO APLICADO

O desenvolvimento da metodologia adotada nessa dissertação foi realizado em etapas, com o auxílio das ferramentas SIG e do modelo de simulação hidráulica.

A primeira etapa consistiu na simulação da rede de abastecimento de água do município de Viçosa.

Na segunda etapa, os registros de reclamações que se referem aos problemas da rede de abastecimento foram espacializados pelo SIG. Este procedimento foi realizado através da união de tabelas dos registros de reclamações e consumidores. As informações ‘consumidores’ são dados georreferenciados disponibilizados pelo SAAE, e foram utilizados para a localização dos registros de reclamações.

Na terceira etapa foi realizada a espacialização dos parâmetros de qualidade da água no SIG. Para isto foram gerados os centróides dos logradouros do município de Viçosa, em razão de serem o único tipo de informação vinculada às amostras coletadas para a análise laboratorial.

Com os dados espacializados, na quarta etapa foi realizada a interpolação dos registros de reclamações, dos parâmetros da qualidade da água e dos dados de pressão, obtidos pelo modelo de simulação. As próximas etapas consistiram no re-escalamento e aplicação da análise multicritério.

Todo o processo está ilustrado no fluxograma da Figura 8 e descrito com mais detalhes nos tópicos seguintes.

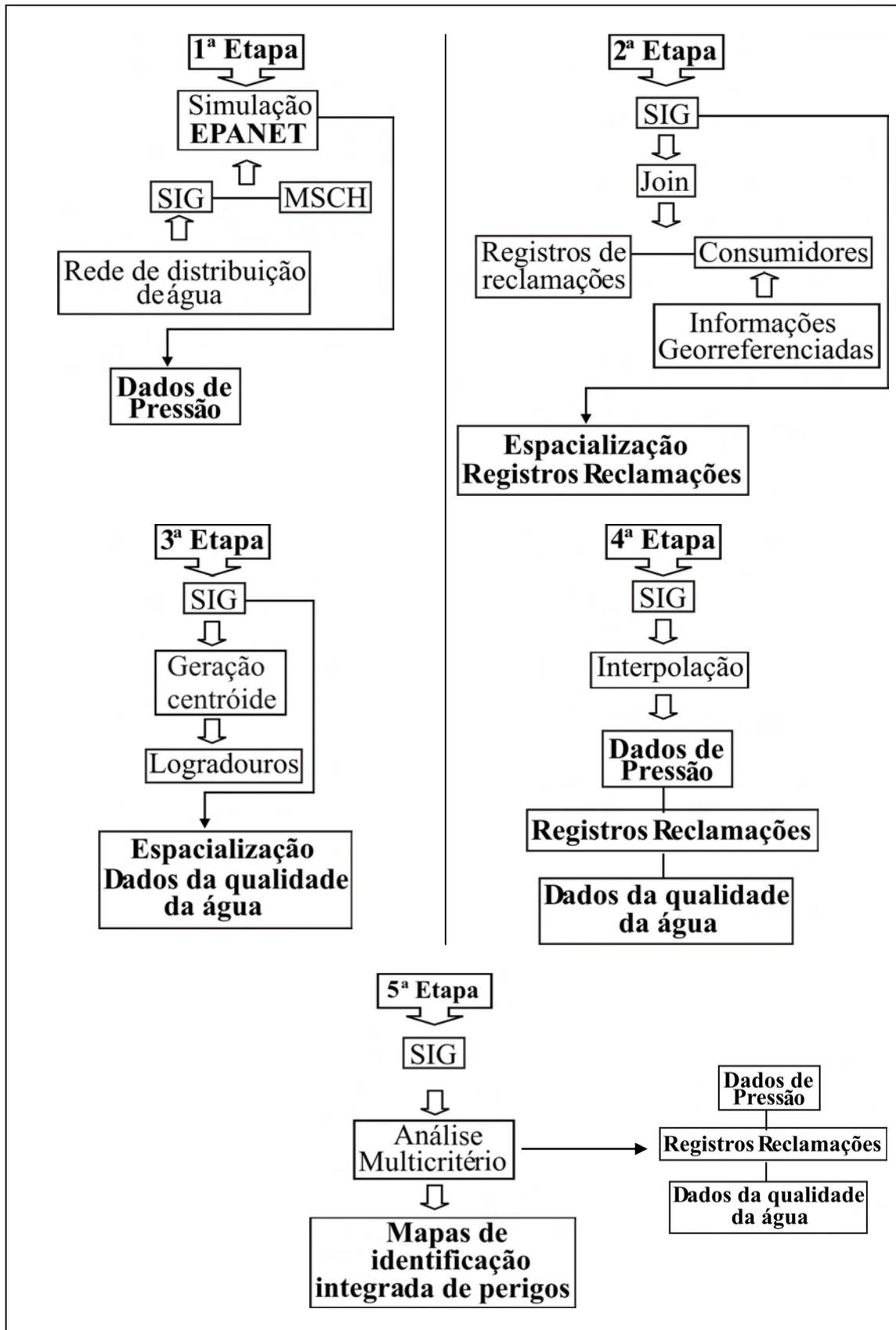


Figura 8. Fluxograma da metodologia de pesquisa.

3.1 Localização e caracterização da área em estudo.

O município de Viçosa está inserido na Zona da Mata Norte do Estado de Minas Gerais, com coordenadas geográficas 20°45'14" latitude sul e 42°52'54" longitude oeste, e ocupa uma área de 299,40 km². Na Figura 9 está representado o limite municipal e seus respectivos bairros.

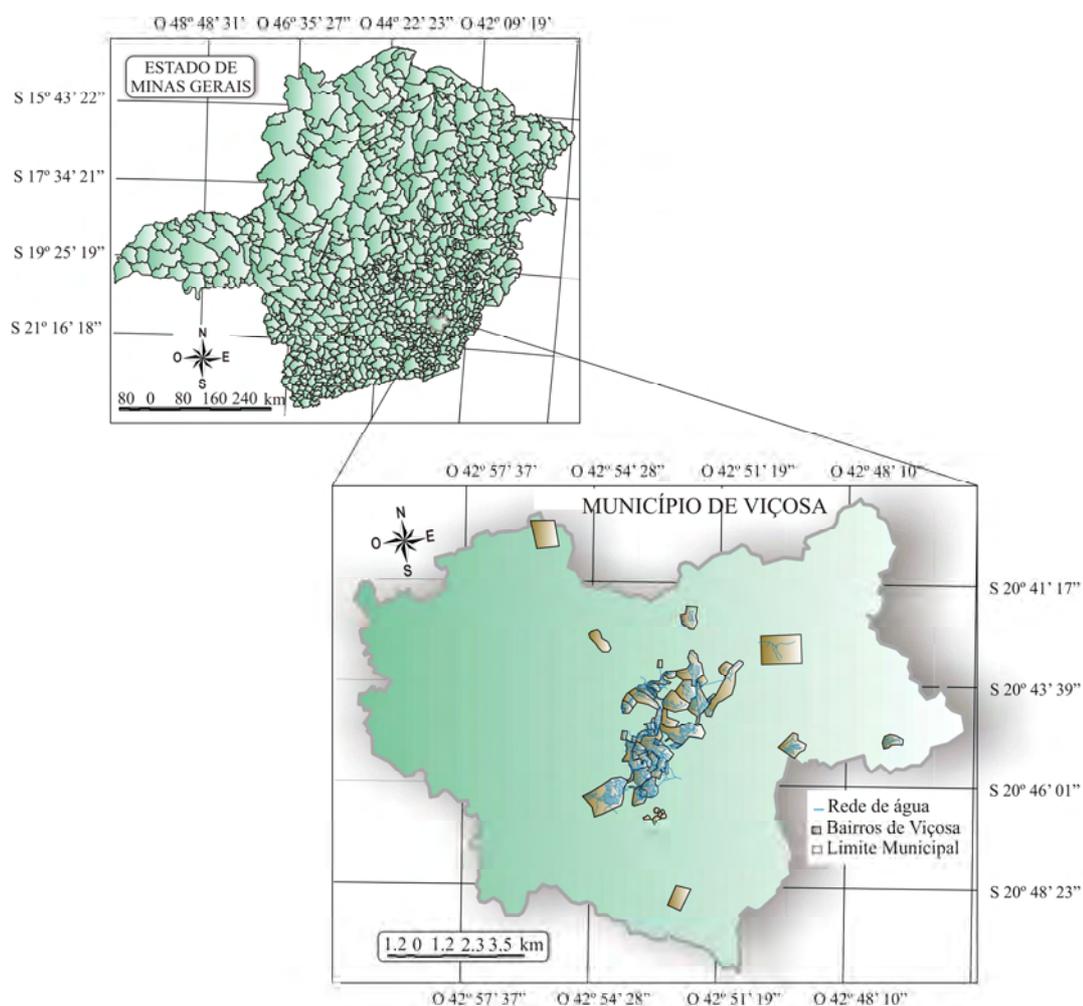


Figura 9. Representação municipal de Viçosa e bairros.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2007), a população de Viçosa é de aproximadamente 70.000 habitantes, sendo que cerca de 90% reside na área urbana do município. A cobertura do serviço de abastecimento de água na área urbana é praticamente integral, por meio da rede de distribuição.

3.2 A rede de abastecimento de água do município de Viçosa

A área urbana do município conta com uma rede de abastecimento de aproximadamente 213 km de extensão. O sistema de distribuição é abastecido por duas estações de tratamento de água, ambas com uma vazão de 100 L/s, supridas por mananciais distintos: ETA I, Ribeirão São Bartolomeu (SB) e ETA II, Rio Turvo Sujo (TS). Um sistema de adução de aproximadamente 16 km permite a interligação das duas ETAs ao sistema de distribuição.

O município tem hoje 60 bairros/distritos, dos quais 47 são abastecidos através da rede de distribuição de água no distrito sede (ou área urbana), com aproximadamente 16.063 ligações e 26.848 economias. Os bairros ou comunidades mais afastados, localizados na zona rural, são abastecidos por poços artesianos. A Figura 10 apresenta a distribuição espacial dos bairros e da rede de distribuição. O sistema de distribuição, assim como as ligações de água, encontram-se georreferenciados.

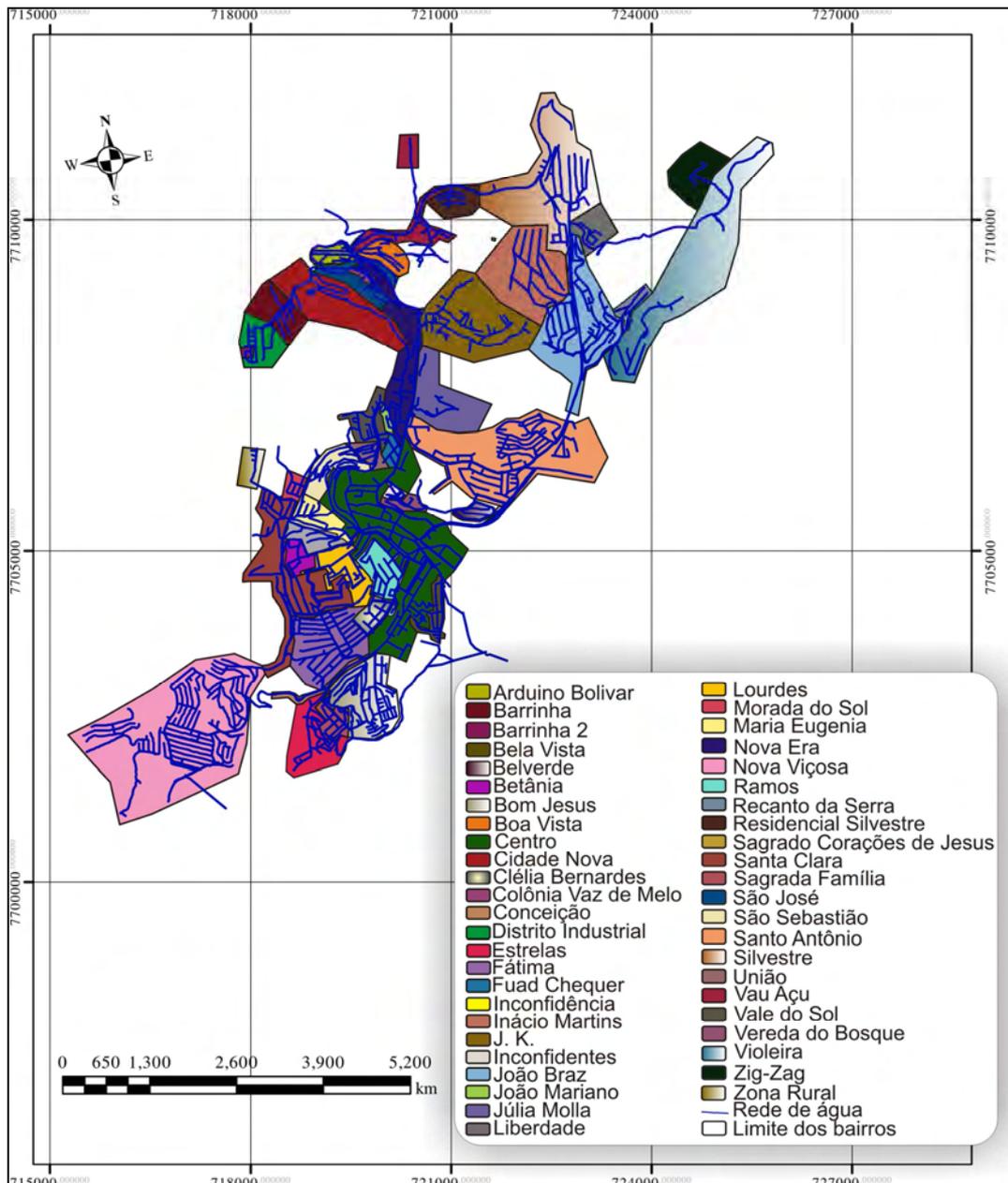


Figura 10. Representação espacial dos bairros e sistema de rede de água de Viçosa.

Na Tabela 6 está representada a classificação dos bairros segundo o número de ligações até dezembro de 2008, dados que se relacionam com as informações de economias, utilizadas no modelo de simulação de hidráulica. As economias citadas representam o local residencial, seja casa ou apartamento, abastecidos pela rede de água.

Tabela 6. Representação do número de ligações por bairros em 2008.

Bairros	Nº de ligações até 2008
Centro	2.360
Santo Antônio	1.692
Nova Viçosa	1.349
Bom Jesus	1.268
Fátima	819
Santa Clara	725
Silvestre	656
João Braz	635
Nova Era	633
Lourdes	403
Estrelas	394
Inácio Martins	343
Vale do Sol	340
São Sebastião	328
Ramos	296
Bela Vista	284
Vau Açu	276
Arduino Bolívar	273
Maria Eugênia	248
Sagrada Família	237
São José	229
União	212
Conceição	187
Sag. Corações Jesus	166
Boa Vista	162
Betânia	161
Cidade Nova	158
Clélia Bernardes	150
Fuad Chequer	141
Barrinha	128
Violeira	112
João Mariano	98
J.K.	96
Belverde	79
Colônia Vaz de Melo	75
Vereda do Bosque	55
Inconfidência	42
Júlia Molla	42
Recanto da Serra	42
Morada do Sol	30
Zig-Zag	29
Distrito Industrial	28
Liberdade	25
Serra Verde	23
Zona Rural	23
Barrinha 2	9
Inconfidentes	2
Σ	16.063

3.3 Softwares e dados utilizados neste estudo

O modelo adotado para a simulação hidráulica da rede de distribuição foi o EPANET versão 2.0, que possui interface com os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e com o AutoCad, o que facilita na migração de informações.

A conversão dos dados do SIG para o EPANET foi realizada através do programa epa2GIS, um executável disponível gratuitamente na internet de responsabilidade da *Zonum Solutions*.

Os softwares de SIG utilizados no trabalho foram o Idrisi Andes (versão 15, © *The Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis*), o ArcView GIS (versão 3.2, © *Environmental Systems Research Institute*), ArcGis (versão 9.2, © *Environmental Systems Research Institute*).

No ArcView foram espacializados os dados da qualidade de água, os registros de reclamações e pressão, sendo realizado no Idrisi a interpolação dos dados mencionados e a análise multicritério, o que resultou a elaboração do mapa de risco à qualidade da água.

Os dados utilizados no trabalho foram disponibilizados pelo setor de geoprocessamento do SAAE, prefeitura da cidade de Viçosa e IBGE. Na Tabela 7, pode ser acompanhada a lista de informações adquiridas para a execução do estudo proposto. Os registros de reclamações e os dados da qualidade da água referem-se ao período de janeiro de 2006 a dezembro de 2008.

Tabela 7. Relação dos dados utilizados no trabalho.

Dados	Tipo de arquivo	Fornecido
Limite municipal	<i>Shapefile</i>	IBGE
Limite estadual	<i>Shapefile</i>	IBGE
Logradouros	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Representação dos Bairros	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Topografia	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Rede de água	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Pontos de consumo	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Zonas de pressão	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Vazão (campo)	Excel	SAAE - Viçosa
Pressão (campo)	Excel	SAAE - Viçosa
Diâmetro trechos	Atributo <i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Rugosidade trechos	Atributo <i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Comprimento trechos	Atributo <i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Nível de água (RNF)	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Nível de água (RNV)	<i>Shapefile</i>	SAAE - Viçosa
Curva da bomba	txt	SAAE - Viçosa
Dados da válvula	txt	SAAE - Viçosa
Registros de reclamações	Banco de dados Access	SAAE - Viçosa
Dados da qualidade da água	Excel	SAAE - Viçosa
Nomes dos logradouros	txt	Prefeitura - Viçosa

3.4 Aplicação do Modelo de Simulação de Hidráulica - EPANET

A primeira etapa realizada na dissertação foi a modelação hidráulica da rede de abastecimento de água de Viçosa, para obtenção dos valores de pressão nos pontos de consumo, utilizou-se o software EPANET.

Como procedimento para a realização da simulação foi necessário representar a rede de abastecimento em formato *shapefile*, com seus respectivos atributos no modelo EPANET. Este processo foi executado primeiro com a representação dos Nós (junções) e posterior com a das tubulações (trechos).

O processo de conversão da rede de abastecimento representada no SIG para o MSCH e vice-versa foi realizado de acordo com as necessidades de preparação da mesma para a simulação, e com a finalidade de exploração dos resultados simulados pelo SIG. A primeira conversão executada foi do SIG para o EPANET e ocorreu em função da geração dos Nós na rede. Em sequência, na segunda conversão, os Nós gerados no EPANET foram exportados para o SIG, com o propósito de se atribuírem as informações de consumo de água e valor de cota para cada Nó. A terceira conversão, do SIG para o EPANET, ocorreu logo após terem sido adicionado os atributos consumo e cota, o que viabilizou a entrada dos dados necessários nos Nós de

maneira automática para a simulação. Este processo pode ser acompanhado através da Figura 11.

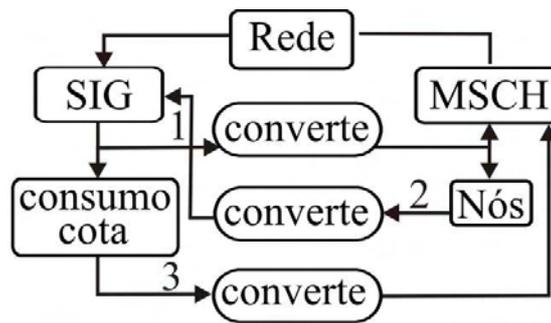


Figura 11. Representação da rede de distribuição de água SIG e MSCH.

Para a geração dos Nós foi realizada a exportação da rede de água do ArcView 3.2 para o EPANET, através do conversor epa2GIS. A rede ao ser importada gera automaticamente os Nós, conforme apresentado na Figura 12. Para estes Nós, exige-se a entrada das informações de cota e do consumo-base, procedimento executado com a representação dos mesmos (Nós) no SIG.

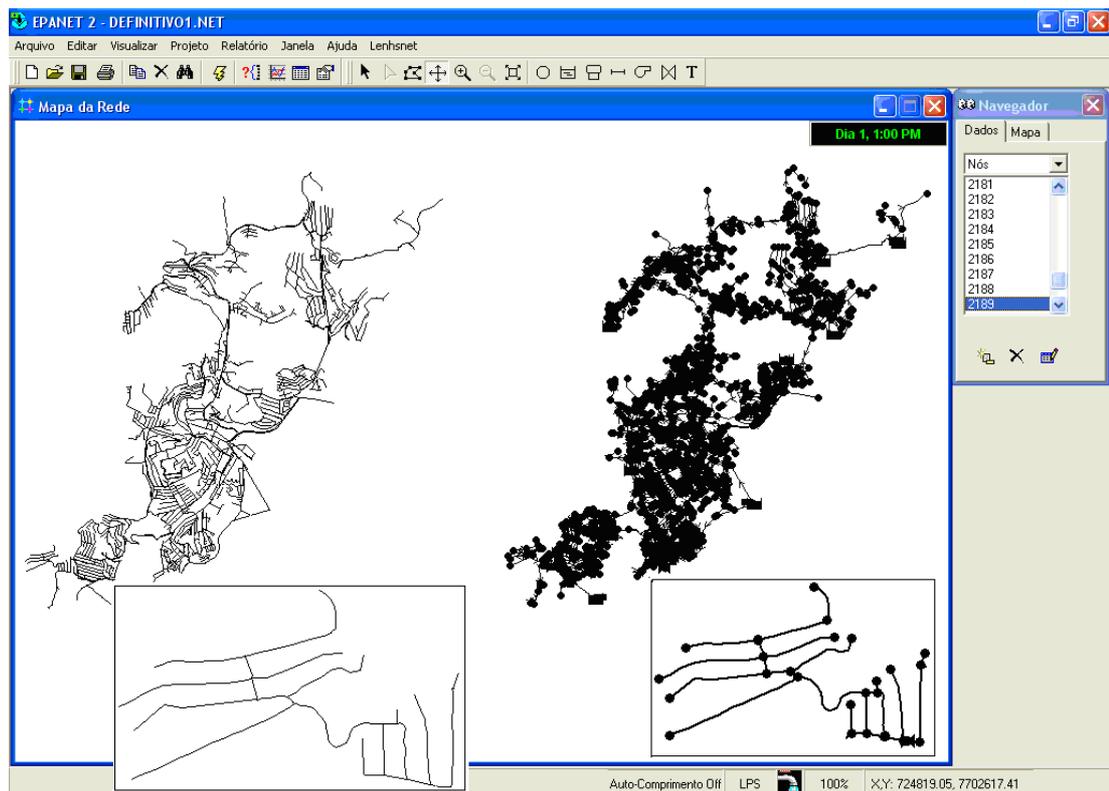


Figura 12. Rede de água no EPANET, à esquerda sem os Nós, à direita com os Nós.

O SAAE de Viçosa contabiliza o consumo-base por zonas de pressão. Neste estudo a contabilização foi feita por segmentos na rede, o que diminui o número de

consumidores por Nó, e conseqüentemente facilita a verificação dos valores de consumo e cota por Nó, caso ocorra algum tipo de problema no período de simulação.

O consumo-base para cada Nó foi obtido em função da demanda de água das ligações existentes na rede. Para tanto, foram criadas ‘zonas de consumo’, por meio de polígonos em torno das ligações que contribuem para um determinado Nó gerado no EPANET (Figura 13). Este procedimento foi avaliado e aprovado pelo SAAE de Viçosa.

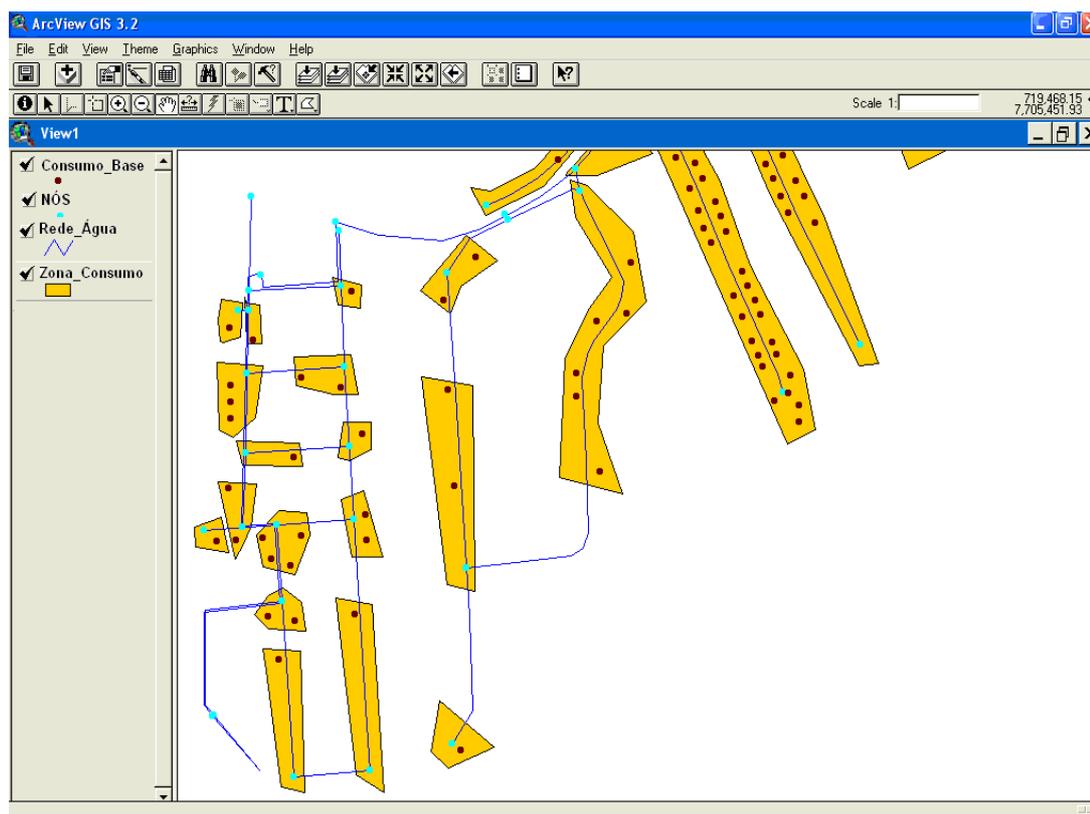


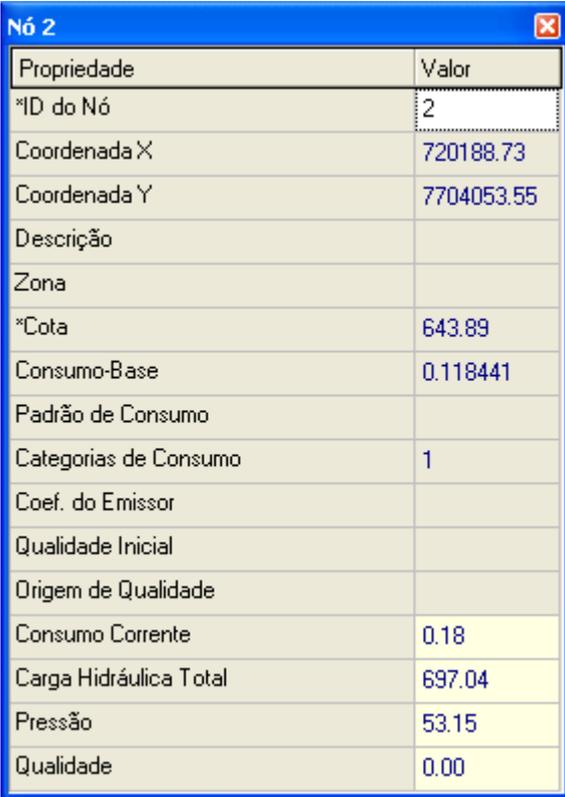
Figura 13. “Zonas de consumo” para a determinação do consumo-base dos Nós.

As informações de cota atribuídas aos Nós gerados no EPANET, foram executadas de maneira automática, por meio das ferramentas SIG disponíveis no *software* ArcView:

- i. Através da ferramenta SIG *surface – create Triangular Irregular Network* (TIN) utilizando os dados pontuais do levantamento topográfico do município de Viçosa foi obtida uma superfície contínua;
- ii. Na tabela do arquivo *shapefile* Nós, foi gerado um novo campo de atributo z (cota);

- iii. Em *Theme – convert to 3D shapefile* os Nós citados anteriormente foram convertidos em 3D;
- iv. Utilizando a função *shape.getz* disponível na calculadora (*Field Calculator*) quando aberta a tabela Nós, foi possível adicionar a cada Nó o valor de cota da superfície interpolada, de maneira automática.

Na Figura 14, encontram-se representados os dados de entrada cota (m) e consumo-base (L/s) e os resultados gerados ou simulados como o consumo corrente (L/s), a carga hidráulica total (m) e a pressão (mca) para o Nó de id 2, já as coordenadas são geradas pelo próprio modelo de simulação, EPANET.



Propriedade	Valor
*ID do Nó	2
Coordenada X	720188.73
Coordenada Y	7704053.55
Descrição	
Zona	
*Cota	643.89
Consumo-Base	0.118441
Padrão de Consumo	
Categorias de Consumo	1
Coef. do Emissor	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	
Consumo Corrente	0.18
Carga Hidráulica Total	697.04
Pressão	53.15
Qualidade	0.00

Figura 14. Dados padrões de entrada e saída do modelo EPANET.

O traçado da tubulação da rede de distribuição ocorreu com a importação do mapa de fundo (traçado da rede) do SIG para o EPANET, sendo aplicado um fator de escala para tornar as dimensões deste mapa, iguais às dimensões reais, o que proporcionou o ajuste do mapa (rede de água) aos Nós representados no modelo de simulação. Desta maneira, a rede pôde ser digitalizada entre os Nós.

A entrada das informações (comprimento, diâmetro e rugosidade) foi executada no próprio modelo de simulação. A cada trecho da rede no EPANET foi verificado o

correspondente no ArcView e adicionada a mesma informação. Os demais dados, como o valor do nível de água para os reservatórios, o valor da curva da bomba, o diâmetro, tipo e padrão de controle das válvulas foram acrescentados diretamente no programa.

Como o sistema de abastecimento de água tem demanda de consumo variado ao longo do dia, foi necessário inserir no sistema o padrão temporal para descrição desta variação.

Os valores do padrão temporal são originados dos dados observados (campo). Foram obtidos por meio do aparelho Datalog, instalados nos pontos de consumo próximos às válvulas reguladoras de pressão (VRP), localizadas na entrada das zonas de pressão. Este aparelho permite a leitura da pressão e da vazão diária em um intervalo de tempo programado. O SAAE de Viçosa considera um intervalo de dez minutos, sendo assim, a cada dez minutos é registrado um valor de pressão e de vazão. Dos valores registrados (leitura) gera-se uma média para o intervalo de tempo referente a cada hora do dia. Ao se adquirir a média de vários dias, uma nova média (final) é calculada, formando o padrão. O padrão é utilizado para o cálculo do fator multiplicativo, sendo o denominador da divisão que envolve a média final.

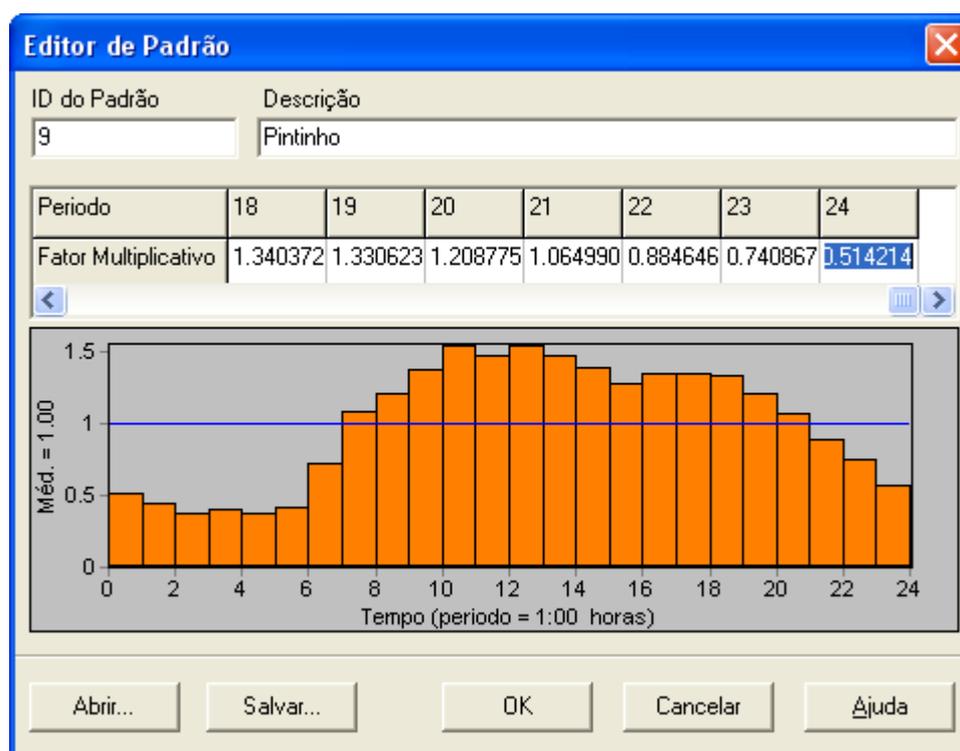
O padrão temporal fornece um conjunto de fatores multiplicativos que são aplicados ao consumo-base para determinar o consumo corrente num determinado instante de tempo. Isto permite que o modelo de simulação considere os momentos de maior consumo e que sejam representadas, com fidelidade, as características do sistema de distribuição de água.

Foram utilizados dez padrões temporais, gerados através das informações de vazão e pressão da rede. Considerou-se para os cálculos, a leitura de 24 horas.

Na Tabela 8 está exemplificada a obtenção do fator multiplicativo para o padrão temporal e, na Figura 15, como estes dados se encontram no modelo de simulação.

Tabela 8. Cálculo do Fator Multiplicativo.

Data/Hora	Vazão	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Padrão	Fator
	Leitura	Dia	27/06	28/06	29/06	30/06	final		Mult.
6/27/2008 0:00	1/s	27/06	1,30555	1,5	1,277767	1,777767	1,465271	2,849537	0,514214
6/27/2008 0:10	2	1,30555	1,194433	1,166683	1,277783	1,333333	1,243058		0,436232
6/27/2008 0:20	1,1667		0,999983	0,944417	1,1111	1,166667	1,055542		0,370426
6/27/2008 0:30	1		1,1111	1,166633	1,19445	1,08335	1,138883		0,399673
6/27/2008 0:40	1,3333		1	1,138883	1,277783	1,333333	1,1875		0,416734
6/27/2008 0:50	0,8333		2,194433	1,833333	1,472217	2,638883	2,034717		0,714052

**Figura 15. Dados do padrão temporal no EPANET.**

Na Tabela 9 foi organizado o número de variáveis utilizadas na modelagem da rede de abastecimento para o município de Viçosa.

Tabela 9. Variáveis utilizadas na modelagem da rede de água de Viçosa.

Variáveis	Dados utilizados na rede modelada	Componentes
Nós	2.263	Físicos
Tubulações	2.385	Físicos
RNF	14	Físicos
RNV	02	Físicos
Bombas	4	Físicos
Válvulas	11	Físicos
Padrões Temporais	10	Não físicos

Após todo o processo de organização e inclusão dos dados no *software* de modelagem hidráulica, foi realizada a simulação para o horário considerado de maior consumo do dia, às 13:00 h.

Os dados utilizados na calibração foram no total 17 Nós, divididos em 9 Nós para a pressão e 8 para a vazão, como apresentado na Figura 16.

Horário	Pressão (agendor)	Pressão (jose augusto de castro)	Vazão (diamantina)	Vazão (oliveira)
00:00	44.38888889	74.05555556	1.222233333	1.472230556
01:00	44.5	76.11111111	1.277766667	1.48889
02:00	45.875	75.47222222	1.111133333	1.422206667
03:00	43.41666667	77.66666667	0.750016667	1.509238889
04:00	36.13888889	74.58333333	0.444433333	1.347205556
05:00	39.76666667	71.375	0.444433333	1.351827778
06:00	34.66666667	71.13333333	0.94445	1.736113889
07:00	30.16666667	68.20833333	1.833316667	3.074077778
08:00	34.86666667	56.83333333	4.19445	4.476851111
09:00	31.23333333	61.56666667	4.166833333	5.194447222
10:00	30.93333333	53.08333333	3.5	5.694441667
11:00	32.20833333	54.16666667	3.222233333	5.717588889
12:00	29.58333333	56.79166667	3.111116667	5.574069444
13:00	32.33333333	53.25	3.194433333	5.560197222
14:00	33.53333333	57.26666667	3.250016667	5.324072222
15:00	36.26666667	60.53333333	3.111116667	4.824077778
16:00	33.93333333	63.16666667	3.083333333	4.541675
17:00	33.08333333	60.69444444	2.888883333	4.578708333
18:00	32.08333333	59.33333333	3.194433333	4.194447222
19:00	32.44444444	56.19444444	2.972216667	2.666672222
20:00	34.73333333	57.97222222	2.6389	4.809261667
21:00	38.3	63.1	2.305533333	3.509255556
22:00	40.19444444		1.638883333	
23:00	42.58333333		1.25	

Figura 16. Dados de calibração para pressão e vazão de rede de água de Viçosa.

3.5 Representação dos dados de registro de reclamações

As reclamações são cadastradas através do serviço de atendimento ao público, disponibilizado pelo SAAE, provenientes de problemas cotidianos observados na rede de abastecimento.

As queixas são registradas em um sistema operacional interno, por meio de um banco de dados no formato Access, organizado por tabelas armazenadas separadamente (bairros, bairros e ruas, motivos, ruas, solicitações entre outros), conforme Figura 17.

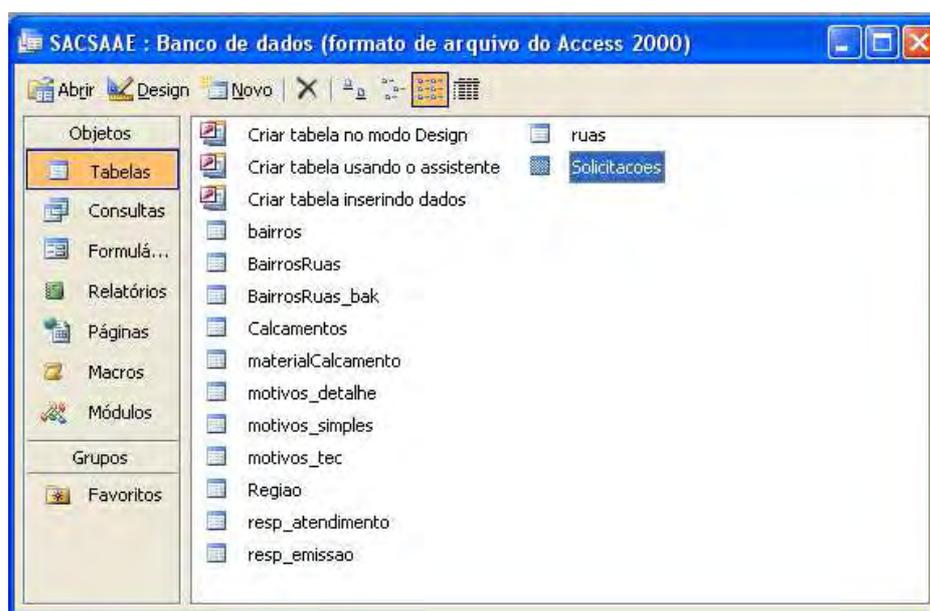


Figura 17. Organização dos dados de registro de reclamações em tabela Access.

Após a junção destas tabelas em uma única tabela, foram preservados os dados de endereço (ruas e bairros) e o motivo da reclamação. Em sequência, a espacialização destes dados no SIG foi realizada através do arquivo *shapefile* consumidores (georreferenciados). O atributo deste arquivo (consumidores) traz várias informações, dentre elas o endereço residencial.

Através do campo número de residência, dado comum na tabela de consumidores, e de reclamações, foi possível uni-las e obter como resultado a localização espacial de cada queixa.

Dos 47 motivos de reclamações, utilizaram-se 13, apresentados na Tabela 10. Foram eliminados os motivos que não se relacionavam aos problemas de distribuição de água e aqueles que não interferiam na vizinhança (casos isolados), ou seja,

consideraram-se “motivos” que afetam várias residências ao mesmo tempo e que interferiam na qualidade da água.

Tabela 10. Lista dos motivos de reclamações utilizados no estudo.

Motivo	Justificativa
Água fechada	A água é fechada em consequência de rompimento noturno ou para a realização de uma nova ligação, suspendendo o serviço de abastecimento.
Água sem pressão	Quando a pressão é negativa ou muito baixa a possibilidade de riscos é muito grande.
Água suja	Foi considerada a causa por tubulação antiga, podendo ser manifestada nos reservatórios residenciais
Tubo quebrado	Tubo quebrado na rede de água (ou esgoto) - procede com a suspensão de água para a manutenção (rua ou zona de pressão)
Esgoto aberto	Caso coincida com o rompimento de água, pode oferecer riscos de contaminação.
Falta de água	A falta de água é considerada alto risco, devido a prováveis contaminações na rede e fontes alternativas.
Fechar água	Caso idêntico com água fechada (a água é fechada para diminuir a perda) - várias casas ficam sem o fornecimento.
Ramal de água vazando	Ramal é a parte da tubulação que está chegando ao hidrômetro, utilizado no transporte da água.
Rede de água vazando	Considerado risco de contaminação ao ser transportada para várias residências.
Vazamento antes do hidrometro	Afeta a vizinhança porque ocorre na tubulação da rede.
Vazamento de esgoto na rede da rua	Mesmo problema do esgoto aberto
Vazamento de esgoto no ramal externo	Mesmo problema do esgoto aberto
Vazamento no cavalete	Cavalete é um tipo de tubulação que conecta o ramal até o hidrômetro, qualquer problema pode afetar no abastecimento.

Na Tabela 11 está representada a lista dos bairros com os respectivos registros de queixas organizados da seguinte maneira:

- Número de reclamações – consiste no valor total de reclamações por bairros;
- Número espacializado – reclamação correspondente aos problemas que interferem em várias residências ao mesmo tempo, como por exemplo, intermitência, provocada por encanação danificada nos logradouros;
- Número não espacializado - reclamação considerada ‘problema’ do tipo individual, como por exemplo, hidrômetro quebrado.

As reclamações consideradas um problema individual foram eliminadas, para que não houvesse incoerência na aplicação do método de interpolação para a geração dos mapas, a partir dos dados de reclamações espacializados de forma pontual no SIG.

Tabela 11. Registro de reclamações na rede de água.

Registro de Reclamações – Período Jan/2006 - Dez/2008			
Bairros	Nº de Reclamações	Nº Espacializado	Nº Não Espacializado
Centro	1 843	549	1 294
Bom Jesus	1 103	307	796
Santo Antônio	1 030	345	685
Fátima	652	191	461
Silvestre	563	143	420
Santa Clara	507	174	333
João Braz	394	134	260
Nova Era	388	126	262
Estrelas	374	130	244
Lourdes	358	95	263
Vau Açu	316	98	218
Vale do Sol	284	83	201
São Sebastião	282	87	195
Inácio Martins	260	58	202
Bela Vista	224	58	166
Ramos	209	77	132
Arduino Bolívar	204	70	134
Sagrada Família	201	63	138
São José	196	46	150
União	186	55	131
Sag. Corações Jesus	164	50	114
Nova Viçosa	164	22	142
Maria Eugênia	158	57	101
Barrinha	134	30	104
Betânia	129	47	82
Cidade Nova	104	26	78
Conceição	112	41	71
Fuad Chequer	109	36	73
Clélia Bernardes	102	31	71
Boa Vista	83	24	59
João Mariano	66	24	42
Violeira	64	6	58
Colônia Vaz de Melo	63	19	44
J.K.	63	13	50
Zona Rural	30	13	17
Júlia Molla	27	4	23
Belverde	25	4	21
Vereda do Bosque	20	7	13
Inconfidência	22	0	22
Recanto da Serra	17	4	13
Barrinha 2	15	0	15
Morada do Sol	15	1	14
Liberdade	12	4	8
Inconfidentes	8	0	8
Zig-Zag	7	2	5
Serra Verde	7	1	6
Distrito Industrial	6	0	6
Σ	11 300	3 355	7 945

3.6 Representação dos dados da qualidade da água no SIG

Os dados de qualidade da água relativos ao período de janeiro 2006 a dezembro 2008 são oriundos do programa de monitoramento na rede de distribuição executado

pelo SAAE de Viçosa, de acordo com as exigências da Portaria MS nº. 518/2004, por meio de análises laboratoriais próprias. Foram utilizados dados de coliformes totais, cloro residual, turbidez, cor, pH e flúor, além do Índice de Qualidade da Água descrito no item seguinte.

Em razão do tipo de informação disponível para a espacialização (relativa a pontos de coletas de amostras ao longo de logradouros), para a representação dos dados foi gerado o ‘centróide dos logradouros’ e a este atribuída à média dos valores de cada parâmetro citado, no total de 192 amostras. Para os logradouros, onde não foram realizadas coletas de amostras, não se geraram centróides. Os centróides foram gerados através da extensão *XTools Defaults version 2003*, disponível para o *software* ArcView.

O procedimento adotado tem como pressuposto que os dados de qualidade da água reunidos no ‘centróide’ do logradouro têm ‘propagação’ ao longo dos logradouros, ou seja, toda a rua, em tese, poderia ser afetada, mesmo que em proporções diferentes em função das distâncias entre os centróides e os pontos amostrados.

3.7 Aquisição do Índice da Qualidade da Água

O Índice de Qualidade da Água (IQA) foi computado com base nos parâmetros citados no item anterior, ou seja, cloro residual, turbidez, flúor, cor, pH e coliformes totais.

Foi adotada a abordagem por Baldasso *et al.* (2002) empregada na Companhia Rio Grandense de Saneamento (CORSAN): para cada parâmetro é estabelecida uma faixa de operação e respectivas notas a partir de um ‘valor ideal’ ao qual é atribuída a nota máxima 100. Para o parâmetro coliformes totais, devido ao resultado não ser numérico (positivo ou negativo) o critério é estabelecido em função do percentual de amostras positivas no período, sendo a nota 100 atribuída para o percentual nulo de positividade (Tabela 12).

Alguns esclarecimentos fazem-se aqui necessários. Inicialmente é preciso ter claro que o critério descrito não guarda, necessariamente, correspondência com o padrão de potabilidade estabelecido na Portaria MS nº. 518/2004. Como explicitado

Baldasso *et al.* (2002), são levadas em consideração a Portaria MS nº. 518/2004, a Portaria 10/1999 da Secretaria Estadual da Saúde do Rio Grande do Sul (fluoretos), além de critérios internos da CORSAN. Enfim, não se pretende aqui referendar uma proposta específica de construção de IQA para água distribuída, no caso a de Baldasso *et al.* (2002), mas apenas se recorreu a uma das opções disponíveis na literatura para um exercício no âmbito dos objetivos desta dissertação, ou seja, o desenvolvimento de ferramentas de mapeamento de perigos.

Tabela 12. Parâmetros da qualidade da água para o cálculo do IQA.

Turbidez		Cloro		Flúor		Cor		pH		Coliformes	
valor	nota	valor	nota	valor	nota	valor	Nota	valor	Nota	valor	Nota
0,0	100	0,0	0	0,0	0	0	100	4,5	0	0	100
0,1	100	0,1	40	0,1	5	1	100	5,0	15	1	99,5
0,2	100	0,2	80	0,2	15	2	100	5,5	30	2	98
0,3	100	0,3	90	0,3	25	3	100	5,6	40	3	95
0,4	100	0,4	95	0,4	40	4	96	5,7	50	4	90
0,5	100	0,5	100	0,5	60	5	92	5,8	60	5	80
0,6	96	0,6	99,5	0,6	80	6	88	5,9	70	6	73
0,7	92	0,7	99	0,7	100	7	84	6,0	80	7	66
0,8	88	0,8	98	0,8	90	8	80	6,1	82	8	58
0,9	84	0,9	97	0,9	80	9	75	6,2	84	9	50
1,0	80	1,0	96	1,0	70	10	70	6,3	86	10	42
1,1	74	1,1	95	1,1	57	15	50	6,4	88	12	35
1,2	68	1,2	94	1,2	40	20	30	6,5	90	15	28
1,3	60	1,3	93	1,3	25	25	15	6,6	92	20	20
1,5	50	1,4	92	1,4	15	30	5	6,7	94	30	8
2,0	30	1,5	91	1,5	5	35	0	6,8	96	40	4
3,0	15	1,6	90	1,6	0			6,9	98	60	2
4,0	10	1,7	88					7,0	100	80	1
		1,9	84					7,2	99		
		2,0	80					7,4	98		
		2,3	70					7,6	97		
		2,7	50					7,8	96		
		3,0	40					7,9	95		
		3,5	25					8,0	94		
		4,0	10					8,1	93		
		5,0	0					8,2	92		
								8,3	91		
								8,4	90		
								9,5	80		
								9,6	70		
								9,7	60		
								9,8	50		
								10,0	40		
								10,2	30		
								10,4	20		
								10,5	10		
								11,0	0		

Fonte: Baldasso *et al.* (2002).

Além das notas é necessário estabelecer o peso de cada parâmetro, representado na Tabela 13:

Tabela 13. Faixa de aceitação dos parâmetros utilizados no IQA.

Parâmetro	Peso	Ideal	Valor Aceitação (Portaria MS nº 518/2004)
Coliformes Totais	30	Ausentes	Ausentes em 95% das amostras
Cloro	20	0,5 mg/L	0,2 a 2,0 mg/L
Turbidez	15	$\leq 0,5$ uT	≤ 1 uT
Flúor	15	0,7 mg F/L	0,6 a 0,9 mg F/L
Cor	10	≤ 3 uH	≤ 8 uH
pH	10	7,0	6,0 a 9,5

Fonte: Baldasso *et al.* (2002).

O cálculo foi realizado através da Equação 1, apresentada na fundamentação teórica.

3.8 Re-escalamento dos mapas

O re-escalamento dos mapas interpolados teve como propósito adequar todas as imagens utilizadas na análise para uma mesma escala, o que tornou possível a integração de todos os dados em ambiente SIG.

Cada critério foi re-escalado levando em consideração seu ‘grau de perigo’, assumido como associado, potencialmente, a diferentes níveis de risco. Dessa maneira, as imagens foram convertidas para um grau de pertinência de 0 e 1, onde às regiões de ‘perigo máximo’ é atribuído o valor 1 e às de ‘ausência de perigo’, valor 0.

Sabe-se, que para o cloro residual livre, pressão e IQA, o perigo/risco potencial aumenta na proporção em que seus valores diminuem; sendo assim, para esses parâmetros, foi utilizada a função *sigmoidal monotônica* decrescente.

Para os parâmetros coliformes totais, flúor, pH, cor, reclamações e intermitência, foi adotada a função *sigmoidal monotônica* crescente, em função do perigo/risco potencial estar diretamente relacionado ao aumento de seus valores.

Para melhor compreensão do procedimento executado, pode ser verificada a Figura 18, onde está demonstrada a descrição de cada fator ao tipo de função membro do módulo *Fuzzy* no *software* Idrisi. Os pontos de controle estão associados aos gráficos da função, ao longo do eixo da abscissa. Na função *sigmoidal* os pontos a, b, c, d representam os pontos de inflexão da curva:

(a) o membro apresenta a tendência maior que zero;

(b) o membro torna-se 1;

(c) o membro fica abaixo de 1;

(d) o membro torna-se zero.

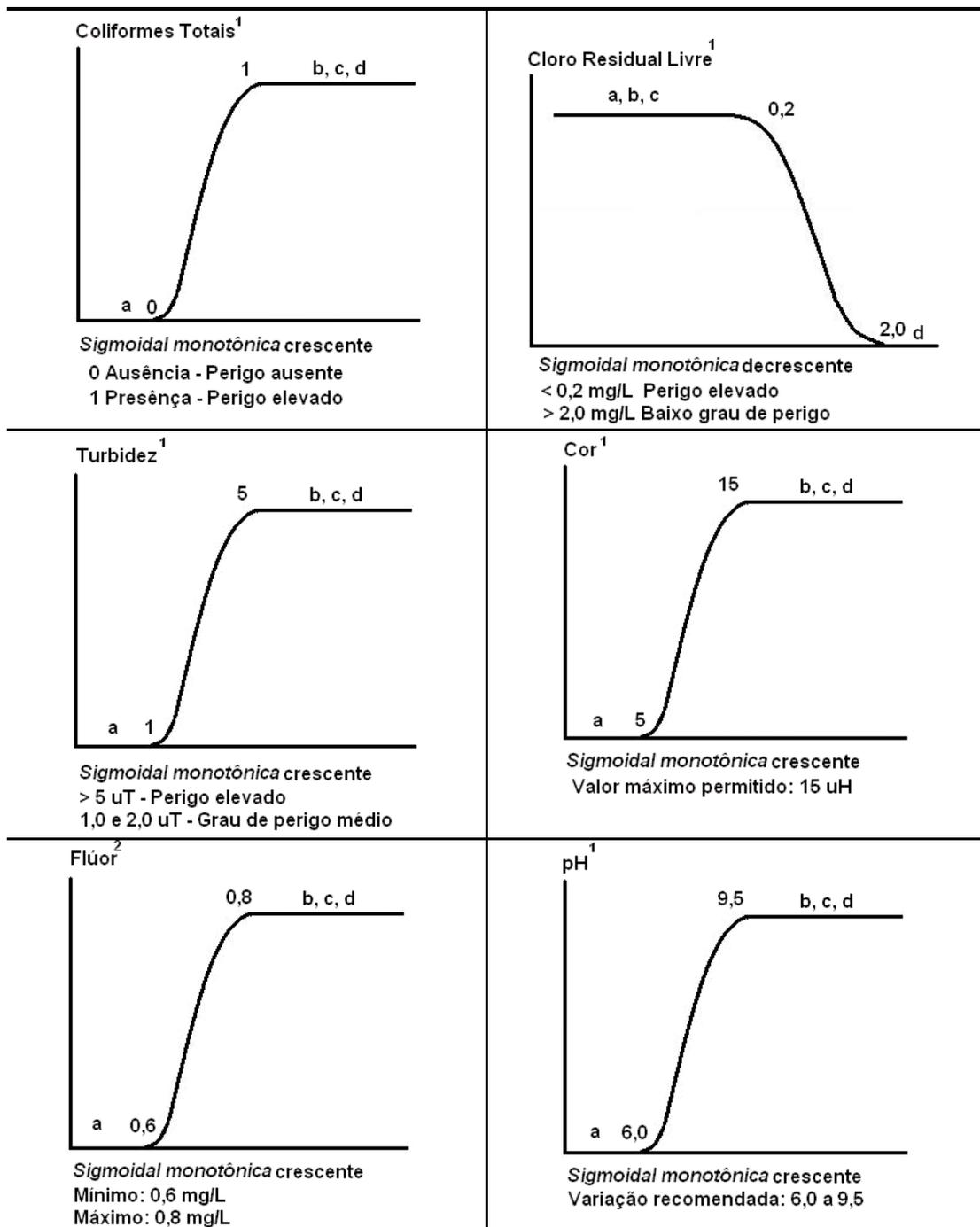
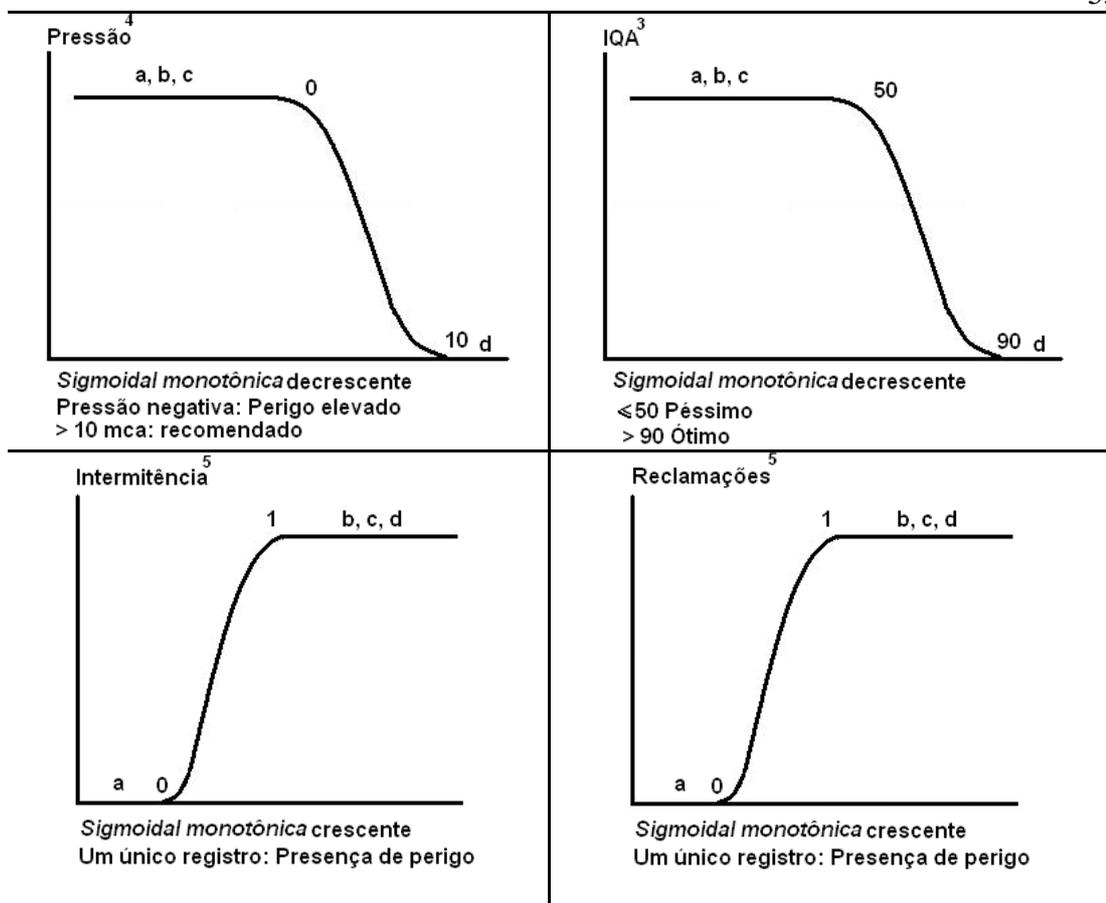


Figura 18. Descrição dos fatores e respectiva função *Fuzzy* (cont.)



(1) Portaria MS nº. 518/2004; (2) adotado dentre os valores especificados na Portaria nº. 635/BSB/1975; (3) adotado para efeito do presente estudo; (4) Portaria MS nº. 518/2004 e NBR 12218; (5) arbitrado para efeito do presente estudo.

Figura 18. Descrição dos fatores e respectiva função *Fuzzy*.

3.8.1 Pesos

Com vista ao processo de decisão final, devem ser atribuídos pesos aos vários parâmetros (critérios), ponderados de acordo com o que se julgue como importância relativa de cada um como fator de perigo/risco potencial, avaliados de acordo com o processo descrito na fundamentação teórica, Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchy Process* - AHP).

Foram analisados três cenários de perigos. No primeiro cenário foram considerados todos os fatores (dados de reclamações, intermitência, qualidade da água e pressão), no segundo cenário os critérios da qualidade da água foram substituídos pelo IQA (índice que envolve os dados de qualidade da água) e mantidos os demais fatores. O terceiro cenário foi gerado utilizando os seguintes fatores: cloro residual livre, turbidez, pressão, registros de intermitência e reclamações.

Para todos os cenários analisados, os dados da qualidade da água foram considerados o de maior relevância, pois, estão diretamente relacionados no monitoramento do fator 'qualidade', em seguida pressão, intermitência e reclamações. A comparação par a par foi definida de acordo com a escala de menor importância entre os fatores.

A Figura 19 ilustra o primeiro cenário e na Tabela 14 os pesos gerados após procedimento de comparação. O resultado dos pesos para cada fator ocorreu de acordo com a importância considerada entre os parâmetros analisados. Na análise a seguir, coliformes totais foram considerados o de maior importância, trata-se de um parâmetro vinculado a presença de patógenos na água, causadoras de doença no homem. Da mesma maneira, os demais fatores foram analisados, conforme descrito na fundamentação teórica.

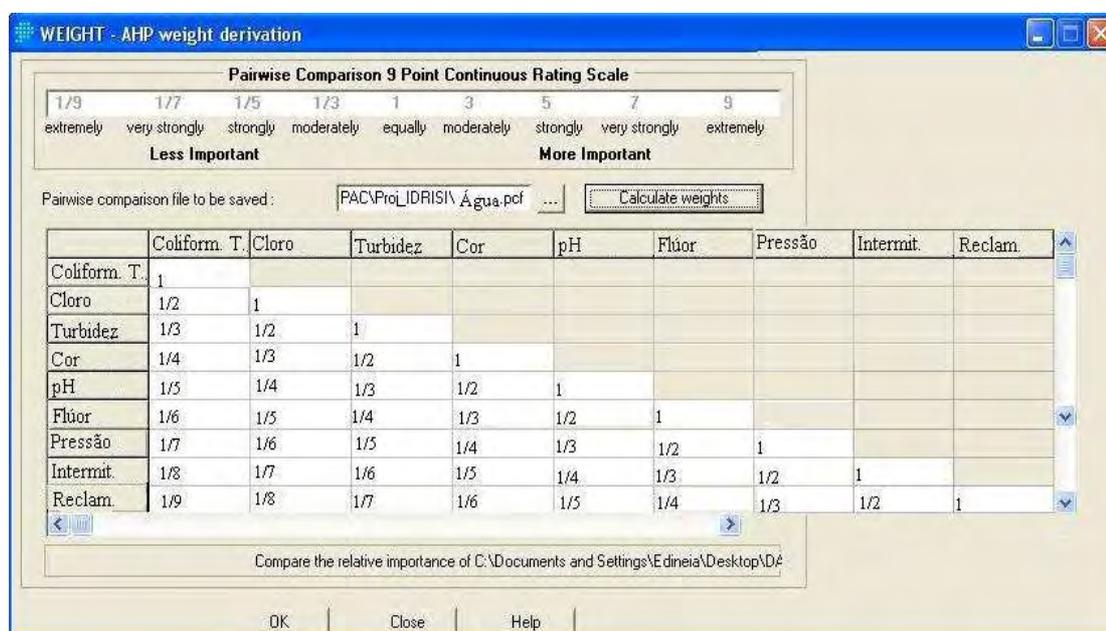


Figura 19. Matriz de comparação pareada para o primeiro cenário.

Tabela 14. Pesos finais resultantes da comparação pareada para o primeiro cenário.

Variáveis	Pesos
Coliformes Totais	0.3121
Cloro Residual Livre	0.2223
Turbidez	0.1555
Cor	0.1075
pH	0.0739
Flúor	0.0507
Pressão	0.0350
Intermitência	0.0247
Reclamações	0.0183

O mesmo procedimento foi empregado para os cenários seguintes, ou seja, os pesos foram obtidos com base na importância atribuída a cada fator. No segundo cenário o IQA substituiu os dados da qualidade da água representados individualmente, e prevaleceu como fator de maior relevância. A Figura 20 e a Tabela 15 ilustram a comparação par a par e a geração dos pesos, respectivamente.

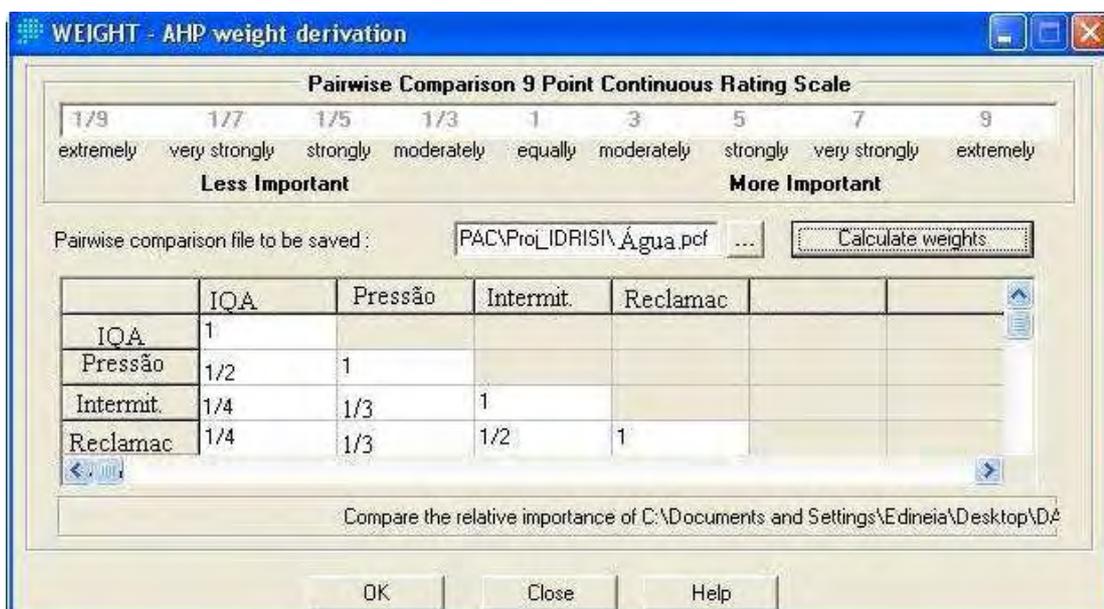


Figura 20. Matriz de comparação pareada para o segundo cenário.

Tabela 15. Pesos finais resultantes da comparação pareada para o segundo cenário.

Variáveis	Pesos
IQA	0.4814
Pressão	0.2954
Intermitência	0.1309
Reclamações	0.0923

O terceiro cenário foi composto por cinco fatores, os quais foram selecionados os parâmetros da qualidade da água de maior importância, cloro residual livre e turbidez, coliformes totais não foram inclusos porque neste estudo não apresentaram um valor significativo de perigo. Utilizou-se também pressão e registros de intermitência e reclamações, podem ser acompanhados através da Figura 21 e Tabela 16.

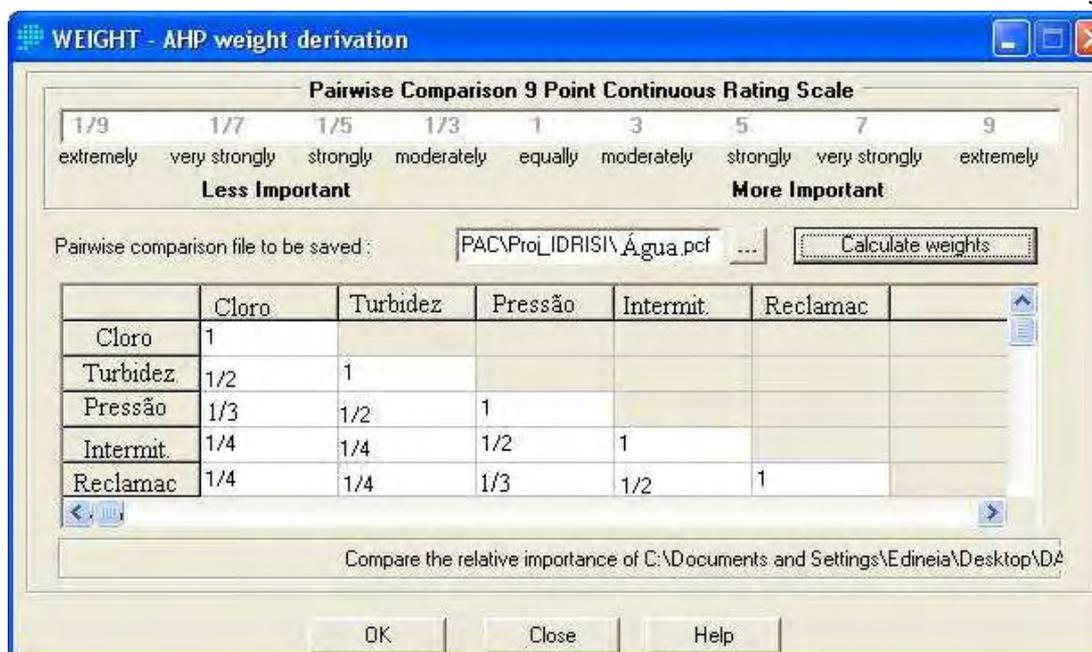


Figura 21. Matriz de comparação pareada para o terceiro cenário.

Tabela 16. Pesos finais resultantes da comparação pareada para o terceiro cenário.

Variáveis	Pesos
Cloro	0,4041
Turbidez	0,2791
Pressão	0,1589
Intermitência	0,0924
Reclamações	0,0655

A técnica utilizada para a definição do cenário de avaliação de risco na rede de distribuição de água foi MCE-WLC.

As imagens obtidas através da técnica WLC correspondem aos três cenários analisados. Após terem sido determinados os pesos, os mapas representados por uma escala de intervalos correspondentes aos perigos/riscos foram gerados.

4. RESULTADOS

Os resultados serão apresentados de acordo com as etapas desenvolvidas para a obtenção do mapa de identificação de perigos na rede de distribuição de água. Assim, serão inicialmente apresentados os resultados da aplicação do MSCH e de algumas ferramentas SIG, para a posterior apresentação do resultado final.

4.1 Mapa de Pressão

Um dos parâmetros a ser levado em consideração como potencial determinante da qualidade da água em redes de distribuição de água é a pressão, pois como visto no item 'fundamentação teórica', a ocorrência de pressões negativas pode causar a introdução de água externa não-tratada no sistema e a possibilidade de contaminação. Assim, quanto menores os valores de pressão, maiores os riscos potenciais. A simulação hidráulica da rede de abastecimento gerou resultados horários de pressão. Foram considerados os valores relativos ao horário de maior consumo, considerado crítico e correspondente às menores pressões na rede (Figura 22). Os resultados obtidos foram exportados para o SIG.

O intervalo de pressão para a rede modelada oscilou entre 30 e 130 mca, algumas pressões mostraram-se menores que 10 mca, porém nenhum valor negativo foi encontrado.

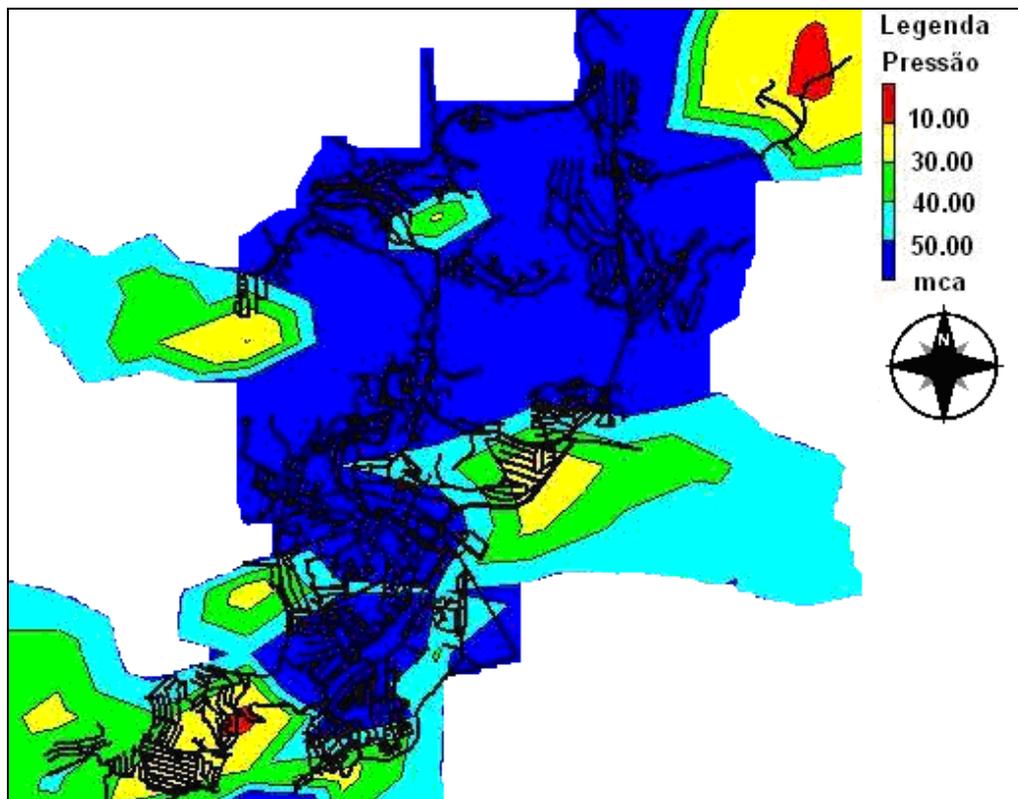


Figura 22. Mapa de pressão na rede às 13:00 h

Uma das etapas envolvidas na modelação hidráulica é a calibração do modelo, essencial para que se possa afirmar, com determinada precisão, a capacidade de simulação das condições reais de funcionamento da rede modelada.

O processo de calibração foi realizado através de ajustes na rugosidade das tubulações, demandas nos Nós da rede, válvulas e nível dos reservatórios. A Figura 23 apresenta o resultado dos valores dos parâmetros hidráulicos simulados e os observados em campo para Nós (pressão) e trechos (vazão), onde pode ser verificada uma proximidade significativa entre os dados comparados (simulados/reais).

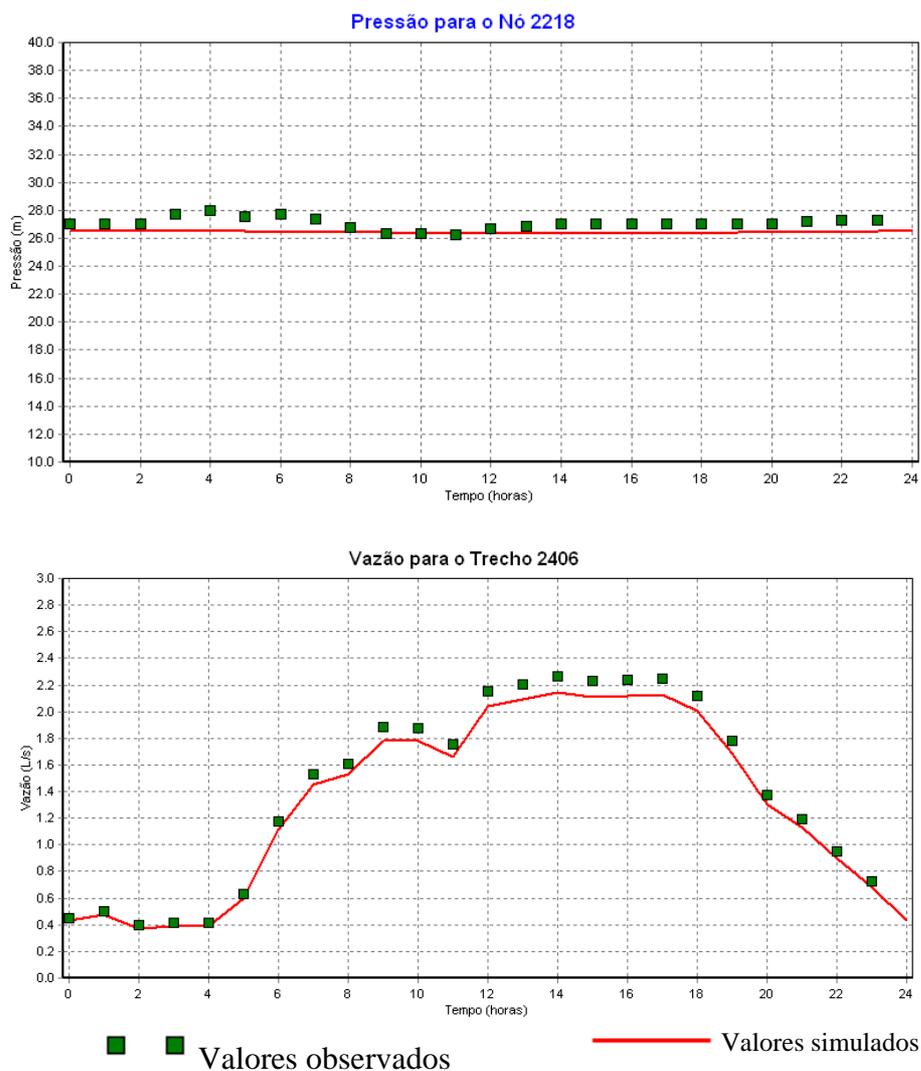


Figura 23. Valores de pressão e vazão simulados.

4.2 Interpolação das variáveis distribuídas no SIG

Os resultados obtidos através da interpolação IDW com o auxílio do Idrisi Andes (© 1987-2006 *Clark Labs*) estão representados pelos mapas a seguir conforme suas respectivas escalas de valores de perigo (Figura 24).

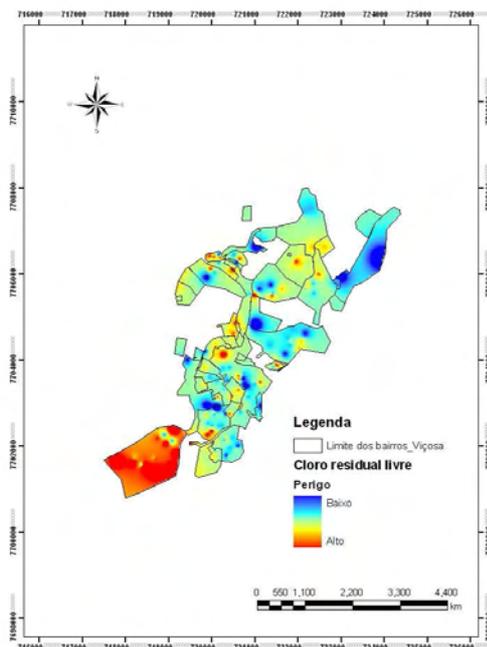
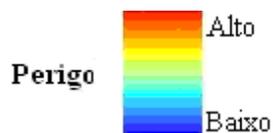
A escala de perigo gerada por cada um dos fatores obedeceu ao risco potencial que oferecem, e a determinação destes perigos seguem mesmo padrão descrito no item 3.7 Re-escalonamento dos mapas.

Entre os mapas interpolados observa-se que os fatores, dentro da área analisada, classificam-se na sua maioria na faixa de 'perigo baixo', sendo justificado por estarem de acordo com o VMP.

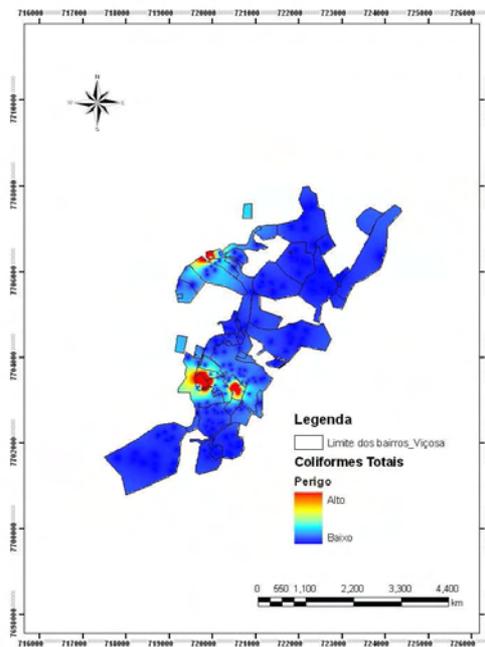
Para o cloro residual livre com incidência de ‘perigo alto’, foi verificado valores entre 0,0 e 0,7 mg/L e nas demais áreas de 0,2 a 1,4 mg/L, mantendo-se no limite aceitável. Já na análise dos parâmetros coliformes totais foram encontradas três amostras com diagnóstico ‘presença’, espacializadas em diferentes locais, em contrapartida a ‘ausência’ é o que prevalece em toda região avaliada.

O fator Cor Aparente apresentou ‘perigo alto’ na região central de Viçosa, tendo em vista que nesta área foram registradas amostras com valores entre 0 e 4 uH, sendo que nas demais, a distribuição para cor foi de 5 a 15 uH, considerado aceitável na análise. O flúor como é considerado um parâmetro preventivo não oferece perigo como os demais parâmetros, no entanto, auxilia na saúde humana, em análise o intervalo fora do VMP encontra-se distribuído nas regiões nordeste e sudoeste da área urbana do município.

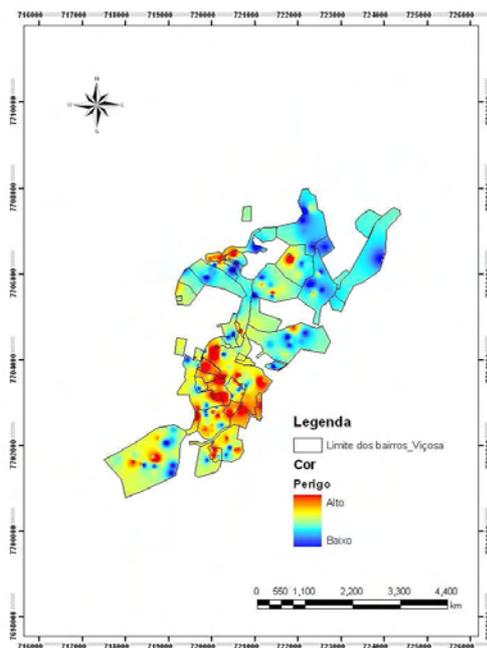
Os mapas de IQA, pH, turbidez, registros de intermitência e reclamações apresentaram-se semelhantes, os perigos tidos ‘altos’ encontram-se isolados, já o ‘perigo baixo’ é o que predomina em toda a área analisada. E no mapa de pressão verificou-se que o resultado ‘perigo alto’ corresponde ao intervalo de valores entre 0,01 e 9,98 mca, descartando valores negativos que requerem maior atenção.



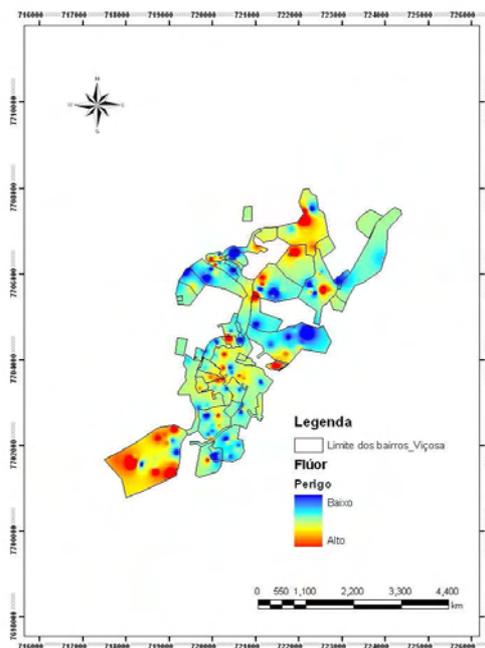
a) Cloro residual livre - mg/L.



b) Coliformes Totais

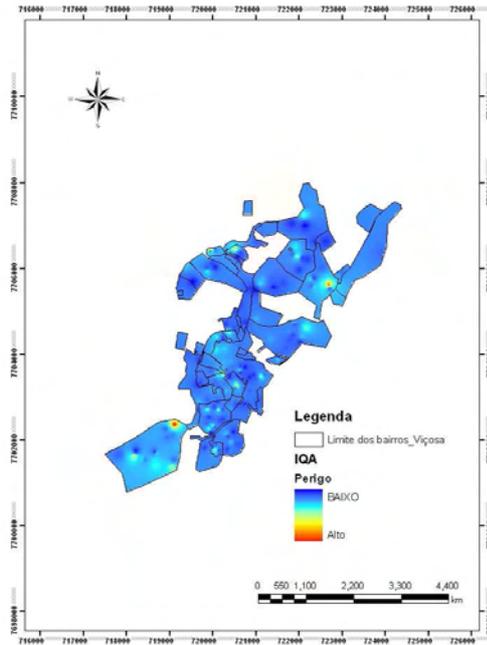


c) Cor Aparente - uH

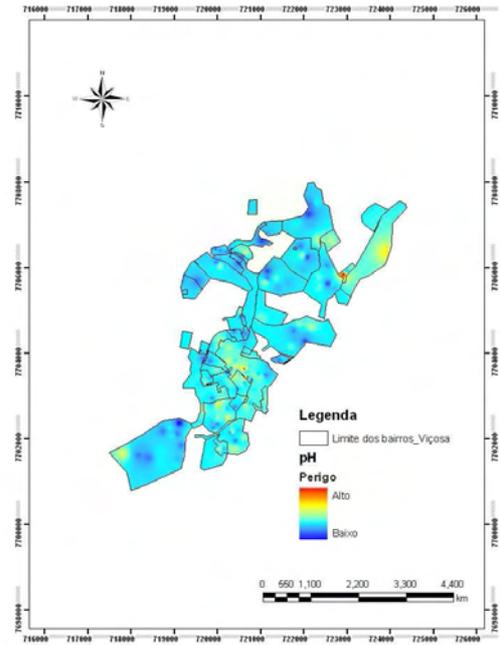


d) Flúor - mg/L

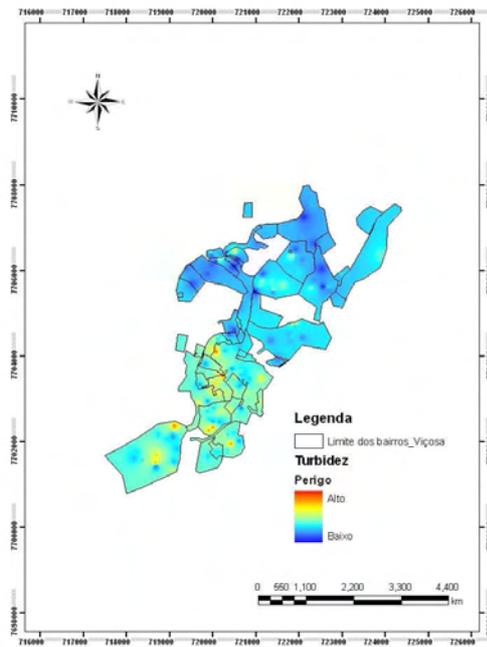
Figura 24. Mapas das camadas de informações (*layers*) – interpolados (cont.).



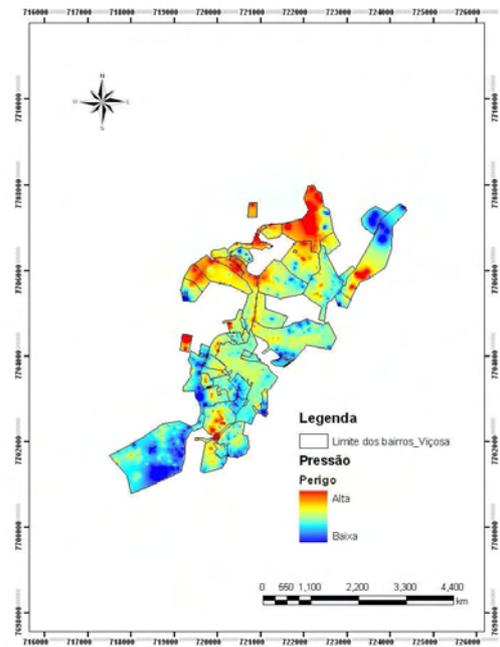
e) IQA



f) pH - unidades de pH

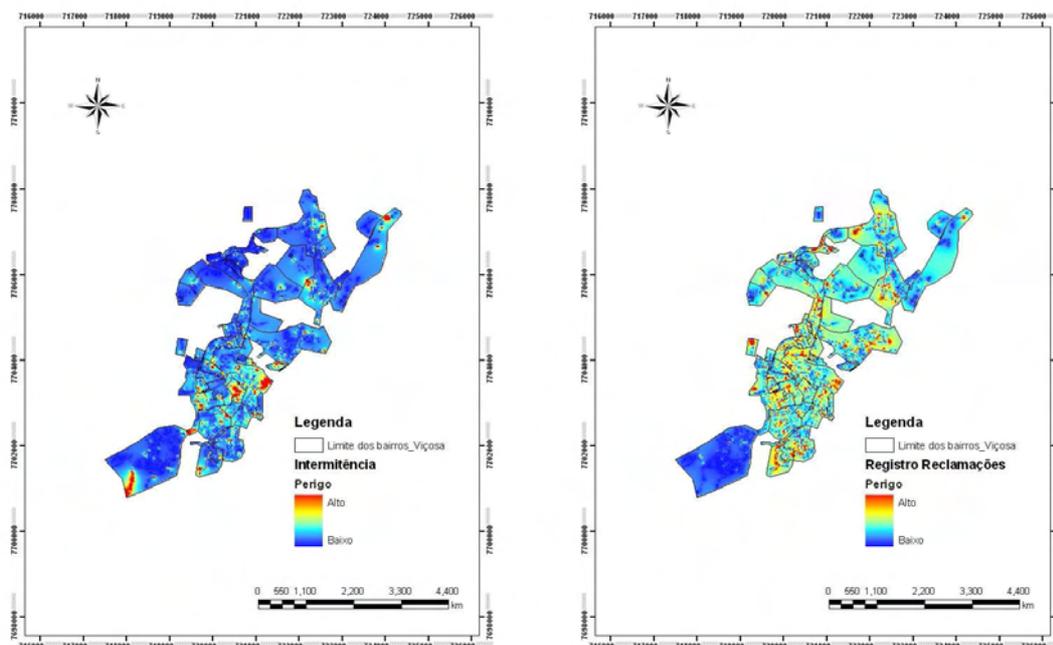


g) Turbidez - uT



h) Pressão - mca

Figura 24. Mapas das camadas de informações (*layers*) – interpolados (cont.).



i) Registro de Intermitência

j) Registro de Reclamações

Figura 24. Mapas das camadas de informações (*layers*) - interpolados.

4.3 Mapas de identificação integrada de perigos

Como já referido, o mapeamento de perigos na rede de distribuição de água foi realizado considerando três cenários, variando os fatores utilizados na análise multicritério.

Em nenhum dos cenários foram identificados elevados graus de perigos na rede, no entanto, para auxiliar na interpretação dos resultados faz-se necessário observar os pesos gerados para cada fator, descritos no item 3.7.1 Pesos. Também devem ser levados em consideração os próprios valores pontuais de cada fator que descreve o grau de perigo oferecido, alguns destes valores podem ser acompanhados nas Tabelas em Anexos A, B e C.

4.3.1 Primeiro Cenário

Relembrando, no primeiro cenário foram considerados os parâmetros da qualidade da água (coliformes totais, cloro residual livre, turbidez, cor, pH, flúor), pressão, registros de intermitência e reclamações.

Como podem ser observados na Figura 25, os locais na faixa ‘perigo alto’, estão localizados nas áreas as quais foram identificadas a presença de coliformes totais, ponderados de maior peso no MCE. As demais áreas encontram-se espacialmente no intervalo de ‘baixo’ grau de perigo, satisfazendo as informações utilizadas na análise, que correspondem na sua maioria ao VMP.

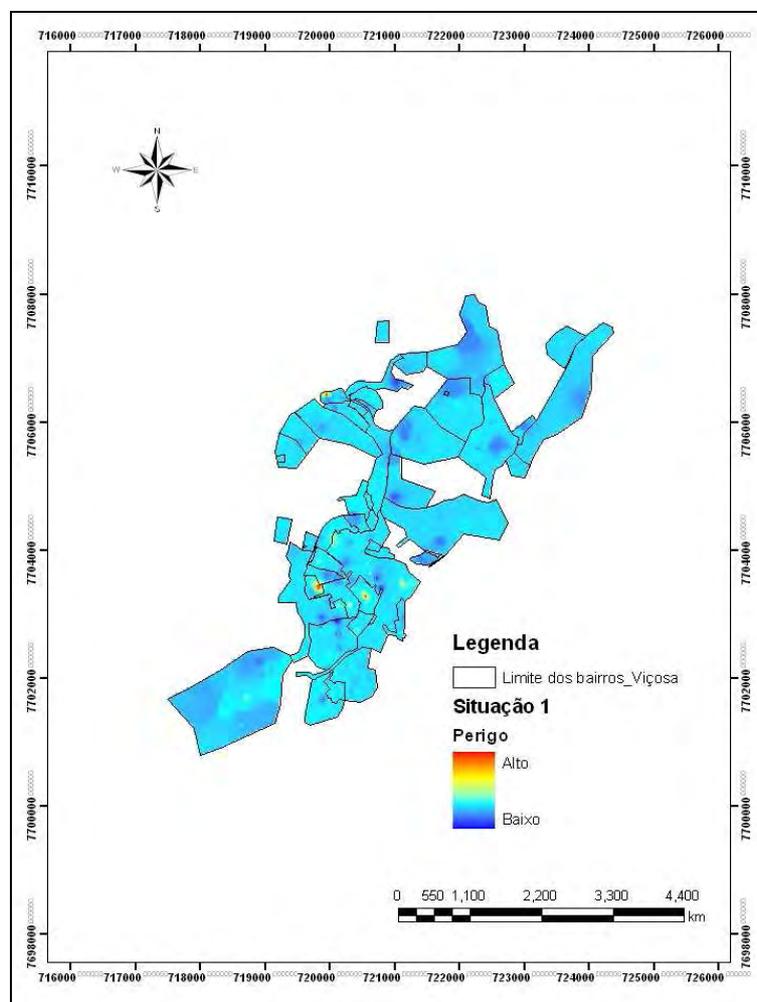


Figura 25. Mapa MCE – WLC – Primeiro Cenário.

4.3.2 Segundo Cenário

No segundo cenário, os parâmetros da qualidade da água aplicados individualmente foram substituídos pelo IQA. Desta maneira, o conjunto de fatores foi determinado pelo IQA, pressão, registros de intermitência e reclamações, com respectiva importância na matriz dos pesos (matriz *weight*).

O mapa gerado na Figura 26 caracteriza-se com predominância na faixa ‘perigo baixo’. Observa-se que entre os fatores utilizados, apenas o mapa de pressão

(interpolado) caracteriza maior grau de perigo. No entanto, o resultado obtido implica na análise do conjunto de fatores selecionados, e principalmente é levada em consideração para a geração do mapa final, a distribuição de pesos, sendo para este cenário o de maior influência o fator IQA.

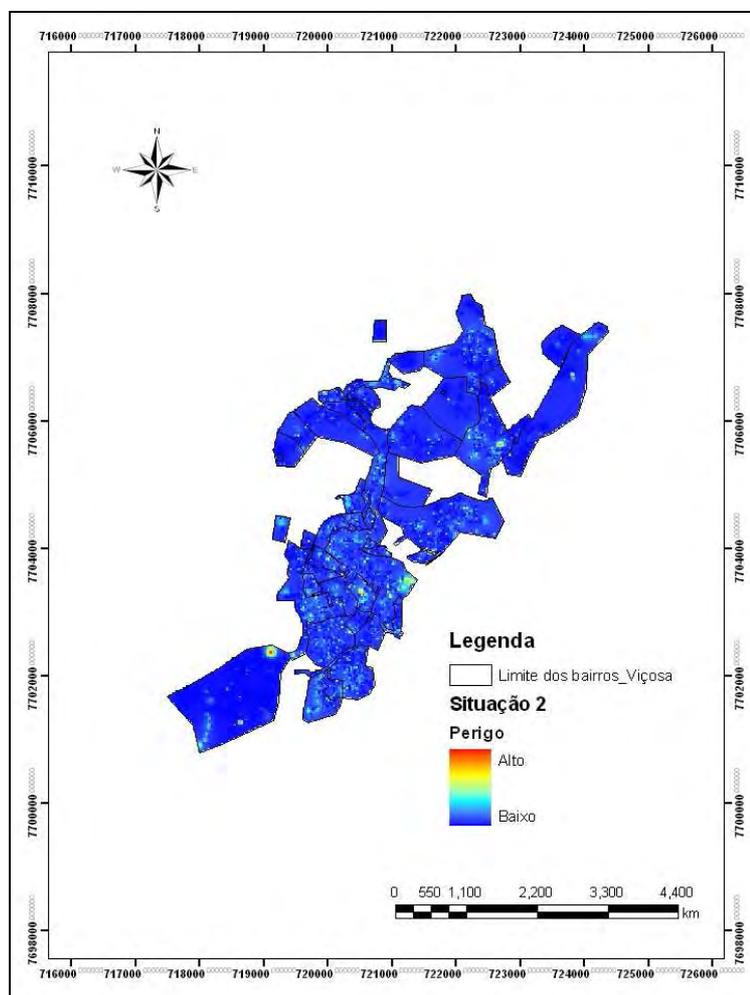


Figura 26. Mapa MCE – WLC – Segundo Cenário.

4.3.3 Terceiro Cenário

No terceiro cenário (Figura 27), foram priorizados os dados da qualidade da água de maior importância sanitária, cloro residual livre e turbidez, entretanto, sem considerar, os dados coliformes totais. Além destes, outros fatores foram utilizados, a pressão, registros de intermitência e reclamações.

Os pesos distribuídos ficaram determinados de acordo com o critério importância, sendo assim, seguiu-se cloro residual, turbidez, pressão, registros de

intermitência e reclamações. Nota-se que em análise do conjunto fatores a localização que apresentou maior grau de perigo reflete os dados de cloro e pressão (ver mapas interpolados). O cenário 3, possibilitou separar e ponderar os fatores que apresentaram alguns valores fora VMP, e com isto gerar um mapa com classes entre todas as faixas criadas (Alto – Baixo). O que pode ser verificado um mapa diferenciado dos demais cenários (1 e 2), confirmando o potencial da ferramenta multi-critério.

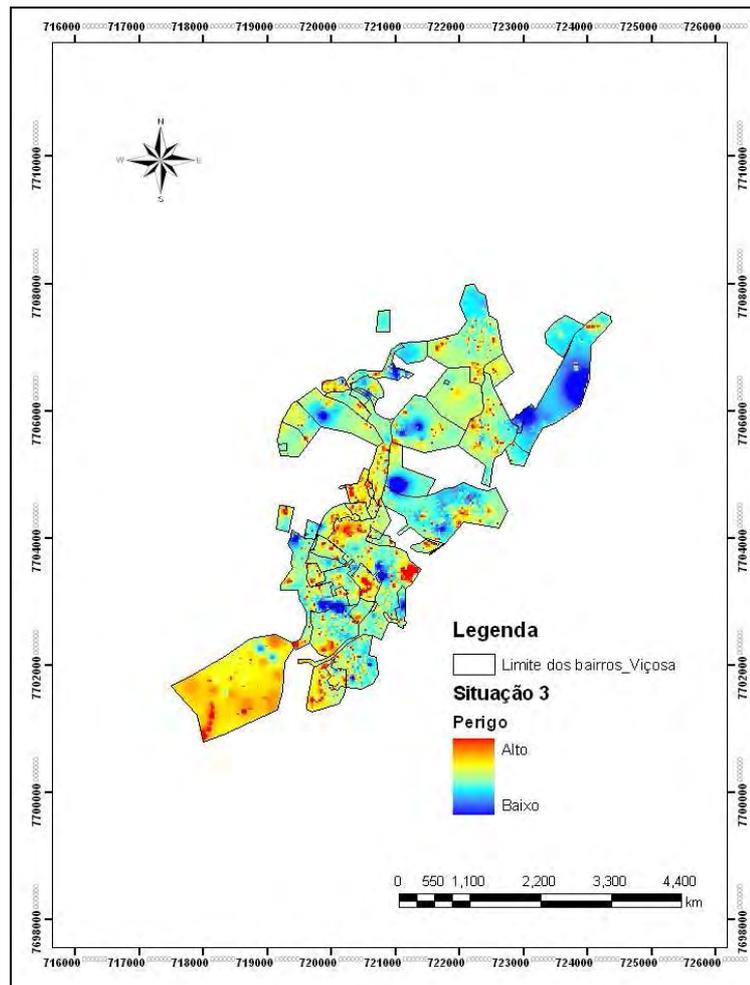


Figura 27. Mapa MCE – WLC – Terceiro Cenário.

Os três cenários formuladas para a identificação de perigos na rede de abastecimento de água apresentaram resultados semelhantes, caracterizando graus de perigos/riscos potenciais baixos em grande parte da área analisada.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A proposta metodológica para o mapeamento de perigos em redes de distribuição de água com a aplicação das técnicas do Sistema de Informações Geográficas foi alcançada, todas suas etapas executadas.

Com a utilização do programa EPANET, das ferramentas de SIG, incluindo as técnicas de análise multicritério, foi possível testar procedimentos metodológicos capazes de abordar, de forma integrada, vários parâmetros e situações de possível influência na qualidade da água. O produto obtido, mapa de perigos, pode constituir importante ferramenta de gerenciamento de sistemas de distribuição de água para o consumo humano, de acordo com a desejada ótica da identificação de perigos e de eventos perigosos e, conseqüentemente da indicação de medidas preventivas.

Reúnem-se indicações de que a ferramenta proposta apresenta potencial de aplicação considerando a espacialização de dados de monitoramento de qualidade da água individualmente, ou de forma integrada, na forma de 'Índices de Qualidade da Água'.

Os resultados sugerem que a ferramenta é sensível à 'captação' de informações sobre perigos, mesmo considerando um pequeno número (porém informativas) de variáveis de qualidade da água, tais como a turbidez e o cloro residual e também quando se consideram variáveis qualitativas, tais como os registros de reclamações e de intermitência.

Entretanto, os resultados encontrados na rede de distribuição de água do município de Viçosa – MG refletem o padrão dos dados trabalhados para a geração dos mapas de perigos.

Para estudos futuros recomenda-se a aplicação e teste dessa metodologia em, outros cenários, envolvendo banco de dados que reflitam águas distribuídas de qualidade distinta e outras formulações de Índices de Qualidade da Água. Particularmente interessante seria a continuidade de teste da metodologia com variáveis qualitativas.

Também se aconselha que na definição de pesos seja realizada uma avaliação com o método Delphi, com a finalidade de análise com a técnica OWA, o que não foi possível neste trabalho em decorrência da demanda de tempo e trabalho das etapas preparatórias da ferramenta metodológica. .

Enfim, conclui-se que a ferramenta proposta pode se configurar com um recurso valioso na etapa de identificação de perigos em Planos de Segurança da Água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINSWORTH, R. **Safe piped water. Managing microbial water quality in piped distribution systems.** Geneva: WHO 2004.

ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective.** Ottawa: WDL Publications 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218:** Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994.

AS/NZS. **Risk Management.** AS/MZS 4360:2004. Sydney: Standards Australia, Wellington: Standards New Zealand, p. 49, 2004.

BALDASSO, M. L., ORTH, F. A., LUZ, L. H. C. Aplicação de Indicador da Qualidade da Água da Rede de Distribuição pelo Método de Notas Técnicas na CORSAN. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, VI, Vitória, ES, 2002. **Anais eletrônicos...** Vitória: ABES, 2002 (CD ROM) . Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/dnov.pdf>> Acesso em fev. 2009.

BARCELLOS, C., COUTINHO, K., PINA, M. F., MAGALHÃES, M. M. A. F., PAOLA, J. C. M. D., SANTOS, S. M. Inter-relacionamento de dados ambientais e de saúde: análise de risco à saúde aplicada ao abastecimento de água no Rio de Janeiro utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 597-605, set. 1998. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v14n3/0096.pdf>>. Acesso em jan. 2009.

BARTRAM, J., FEWTRELL, L., STENSTRÖM, T. A. Harmonised assessment of risk and risk management of water-related infectious disease: an overview. In: BARTRAM, J., FEWTRELL, L. (eds) **Water quality: guidelines, standards and health – Assessment of risk and risk management for water – related infectious disease.** pp. 1-16, London, UK: World Health Organization, IWA Publishing. 2001.

BASTOS, R. K. X., BEVILACQUA, P. D., NASCIMENTO, L. E., CARVALHO, G. R. M., SILVA, C. V. Coliformes como indicadores da qualidade da água. Alcance e limitações. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2000. (CD-ROM).

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, 2001, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001. (CD-ROM).

BASTOS, R. K. X., BEVILACQUA, P. D., ANDRADE, C. O. N., VON SPERLING M. Utilização de esgotos tratados em irrigação: aspectos sanitários. In: Bastos R. K. X. (Org.). **Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e psicultura**. São Carlos: RiMa Artes e Texto, p.23-60. 2003b. (Projeto PROSAB).

BASTOS, R. K. X., HELLER, L; FORMAGGIA, D. M. E. **Comentários sobre a Portaria MS. N.º 518/2004: subsídios para implementação**. Brasília. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde, 92p. 2005.

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, Belo Horizonte - MG, 24, 2007. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2007a (CD ROM).

BASTOS, R. K. X., HELLER, L., PRINCE, A. A., BRANDÃO, 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-DF: Ministério da Saúde, 252p. 2007b.

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. (Ed). **Remoção de microrganismos patogênicos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro; ABES 2009.

BERNSTEIN, P. **O Desafio aos Deuses: a fascinante história do risco**. Rio de Janeiro: Campus, 389p. 1997.

BEZDEK, C. J., PAL, S. K. **Fuzzy models for pattern recognition**. New York: IEEE Press, 1992.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 518 de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 mar. 2004. Seção 1. p. 266. Disponível em: <<http://portal.saude.gov.br/saude/>>. Acesso em nov. 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 635/Bsb de 26 de dezembro de 1975. Aprova normas e padrões sobre a fluoretação da água dos sistemas públicos de abastecimento destinada ao consumo humano... Disponível em: <<http://www.saude.rs.gov.br/dados/1161004568515PORTARIA635.pdf>>. Acesso em jan. 2009.

BROWN, P. M., MCCLELLAND, N. I., DENINGER R. A., TOZER, R. G. **A water quality index - do we dare?** Water & Sewage World, pp339-343. 1970.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographic Information Systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press. 1986. (Monographs on Soil and Resources Survey, 12).

CALIJURI, M. L., MELO, OLIVEIRA A. L., LORENTEZ, J. F. Identificação de áreas para implantação de aterros sanitários com uso de análise estratégica de decisão. **Informática Pública**. v.4, n.2, p. 231-250. 2002. Disponível em: <http://www.ip.pbh.gov.br/ANO4_N2_PDF/ip0402calijuri.pdf> Acesso em: nov. 2008.

CÂMARA, G., DAVIS, C. Fundamentos de Geoprocessamento. **V Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento da América Latina**. Salvador, Bahia, Brasil, 19-23 jul., 1999.

CÂMARA, G., MONTEIRO, A. M., DRUCK, S., CARVALHO, M. S. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S., CARVALHO, M. S., CÂMARA, G., MONTEIRO, A. M. V. (eds). **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; 2004.

CÂMARA, G., MEDEIROS, J. S. Modelagem de dados em geoprocessamento. In: ASSAD, E.; SANO, E. E. (eds.). **Sistema de Informações Geográficas. Aplicações na agricultura**. Brasília, DF: EMBRAPA, 1998 (2a. edição, revista e ampliada).

CASTRO, C. M., PEIXOTO, M. N. O., RIO, G. A. P. Riscos ambientais e geografia: conceituações, abordagens e escalas. **Anuário Instituto de Ciências**, UFRG, v. 28, n. 02, p. 11-30, 2005.

COVAS, D., ALEGRE, H., MONTEIRO, A. J. Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água. **Relatório Técnico**. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), abril 2008. Disponível em: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/179973/1/GAvSistAbAgua_Mod%202_2%20-%20Modelacao%20e%20analise%20de%20SAA.pdf> Acesso em nov. 2008.

EASTMAN, J. R. Idrisis Andes. **Guide to Gis and Image Processing**. Clark University, MA – USA. 328p. 2006.

FEINBERG, D., UHRICK, S. W. Integrating GIS with Water and Wastewater Hydraulic Models [on line]. (ed.) **ESRI International User Conference**. San Diego, CA. Proceedings. July 08-11, 1997. [cited February 2001]. Disponível em: <<http://www.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to200/pap199/p199.htm>> Acesso em ago. 2008.

FERREIRA, J. C., ROCHA, J., TENEDÓRIO, J. A., SOUSA, P. M. – Ensaio de Delimitação de Corredores Verdes na Área Metropolitana de Lisboa. Integração de dados *fuzzy* através da análise multi-critério. **VIII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica**, Lisboa, USIG, CD-ROM. 2004. Disponível em: <http://www.igeo.pt/IGEO/portugues/servicos/CDI/biblioteca/PublicacoesIGP_files/ESG_2004/p044.pdf> Acesso em nov. 2008.

FREITAS, C. M., GOMEZ, C. M. Análises de riscos tecnológicos na perspectiva das Ciências Sociais. **Manguinhos**, v. III, n. 3, p. 485-504. 1997. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/hcsm/v3n3/v3n3a06.pdf>>. Acesso em: ago. 2006.

FREITAS, C. M. Avaliação de riscos como ferramenta para a Vigilância Ambiental em Saúde. **Informe Epidemiológico do SUS**; v. 11, n. 3/4, p. 227–239. 2002.

GASTALDINI, M. C. C., SOUZA, M. D. S. 1994. Diagnóstico do Reservatório do Vacacaí Mirim através de Índices de Qualidade de Água. In: **Seminário de Qualidade de Águas Continentais no Mercosul**. Porto Alegre, 1994. Disponível em: <www.bvsde.paho.org/bvsaidis/.../BR08485_Cauduro_Gastaldini.pdf> Acesso em dez. 2008.

GROHMANN, C. H. Introdução à Análise Digital de Terreno com GRASS-GIS. **Relatório Técnico baseado no manual dos módulos do GRASS**. Instituto de Geociências – USP. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.igc.usp.br/pessoais/guano/downloads/tutorial_grass6.pdf> Acesso em jun. 2009.

HUNTER, P. R., FEWTRELL, L. Acceptable risk. In: FEWTRELL, L; Bartram J. (Ed.) **Water quality guidelines, standards and health: assessment of risk and risk management for water related infectious disease**. London: WHO, IWA Publishing, p. 207-227. 2001.

HRUDEY, S. E., HRUDEY, E. J. Drinking water risk Management principles for a total quality management framework. **Journal of Toxicology and Environmental Health Part A**, v. 67, pp. 1555-1566 (12). 2004.

IBGE. **Cidades@**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.ht?1>> Acesso em: jan. 2009.

ISAAKS E. H., SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. Oxford University Press, Inc, New York, NY, 1989.

LIMA, J. P., RAMOS, R. A. R., JÚNIOR, J. L. F. Uma abordagem multicritério para a priorização de vias pavimentadas. **Revista Transporte**. v. XVII, n. 1, p.27-38. 2009. Disponível em: <http://www.revistatransportes.org.br/index.php/anpet/article/view/73/65>. Acesso em: jul. 2009

MC DANIELS, T. L., KAMLET, M. S., FISCHER, G. W. Risk perception and the value of Safety. **Risk Analysis**, v. 12, n.4, pp. 495-503. 1992.

MOURA, A. N. **Sistema de informações geográficas aplicado à sistema de abastecimento de água**. p. 145. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2001 Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000219017>> Acesso em ago. 2008.

NEIVA, S. B. **A escolha de softwares de E-Procurement: uma análise multicritério**. p. 60. Dissertação (Mestrado em Administração Geral) - Faculdade de Administração e Economia, Ibemec, Rio de Janeiro. 2006.

NOBRE, R. C. M. **Avaliação de Risco para o uso e proteção de aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió – AL**. p. 311. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

PEDROSA, B. M., CÂMARA, G., MONTEIRO, A. M. V. Ambiente computacional para modelagem espacial dinâmica. **Relatório Técnico**. Ministério da Ciência e

Tecnologia (CT BRASIL). 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_ambiente_modelagem.pdf> Acesso em nov. 2008.

PEREIRA, M. T. R. **Metodologia multicritério para avaliação e selecção de sistemas informáticos ao nível industrial**. p. 317. Tese (Doutorado em Investigação Operacional) - Escola de Engenharia Portugal, Universidade do Minho, Portugal. 2003.

PINA, M. F. Armazenamento dos Dados em SIG. In: CARVALHO, M. S., PINA, M. F., SANTOS, S. M. (Orgs.) **Conceitos básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia aplicados à saúde**. Brasília, Ministério da Saúde, 2000.

Plano de Segurança da Água FLI LISBOA 09/11/2006. Disponível em: <http://www.apda.pt/apda_resources/APDA.Biblioteca/APDA%5Cseminarios%5C7%20Planos%20de%20Seguran%C3%A7a%5Ccec%C3%ADlia%20alexandre.pdf> Acesso em ago. 2008.

QUEIROZ, G. B., FERREIRA, K. R. Bancos de Dados Geográficos. **Tutorial sobre banco de dados geográficos**. GeoBrasil – Instituto Nacional Pesquisas Espaciais (INPE). 2006. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/TutorialBdGeo_GeoBrasil2006.pdf> Acesso em jan. 2009.

RAZZOLINI, M. T. P., NARDOCCI, A. C. Avaliação de risco microbiológico: etapas e sua aplicação da qualidade da água. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente (INTERFACEHS)**. v.1, n.2, 2006. Disponível em: <www.interfacehs.sp.senac.br>. Acesso em ago. 2008.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 5ª ed.: Ed. da Universidade Federal de Uberlândia, 2003. Uberlândia – MG.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2. Users Manual**. U.S. Environmental Protection Agency – EPA. 200p. 2000. Cincinnati, Ohio. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/epanet.html>> Acesso em ago. 2008.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 287p. 1980.

SILVA, R. E. L. **Metodologia para identificação das margens urbanas metropolitanas por uma abordagem multi-estratégica. Uma Aplicação à Área Metropolitana de Lisboa**. p. 202. Dissertação (Mestrado em Gestão do Território) - Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 2007.

TOBLER, W. Cellular geography. In: S. Gale and O. G. (ed). **Philosophy in Geography**. Dordrecht, Reidel, v.1, p.379-386, 1979.

VIEIRA, P., COELHO, S. T., PRAÇA, P. Controlo do residual de cloro em sistemas de transporte e distribuição de água. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENTIDADES GESTORAS, LISBOA, 2001, **Anais...** 20p 2001.

VIEIRA, J. M. P., MORAIS, C. **Manual para a elaboração de planos de segurança da água para consumo humano**. Lisboa: Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Universidade do Minho, 175 p.2005. (Série Guias Técnicos, 7).

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. v. 1, 3ª ed. – Recommendations. Geneva: WHO, 2004.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Water safety plans: managing drinking-water quality from catchment to consumer**. Geneva: WHO, 224 p. 2005. Disponível em: <<https://www.who.int/wspportal/wsp/en/>> Acesso em: set. 2008.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking water quality [electronic resource]: incorporating first addendum**. v. 1, Recommendations. – 3ª ed. Geneva: WHO, 595p. 2006. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq0506.pdf> Acesso em: ago. 2008.

Zonum Solutions. **shp2epa/gis2epa**. Disponível em: <<http://www.zonums.com/epa2gis.html>> Acesso em: set. 2008.

ANEXO A

Anexo A.1 - Dados de Pressão

A tabela A.1, representa os dados de pressão obtidos através da modelação hidráulica da rede de abastecimento de água, realizada para o município de Viçosa – MG. Foi gerado pelo modelo EPANET 2 263 Nós, os quais forneceram o valor do parâmetro citado. Apenas parte tabela será apresentada.

Tabela A.1 Dados de Pressão

*	EPANET		2 Brasil	*
*	Hidráulica	e	Qualidade	da Água
*	Simulação	da	Rede	*
*	Versão	2.00.11		*

Arquivo de Rede:			DEFINITIVO1.NET	
shp2epa:				
Imported data from			shp_decimais.shp	
Resultados nos NÓS às 13.00 HORAS				
Nó	ConsumoCarga	Hidráulica	Pressão	Qualidade
ID	LPS	m	m	%
1	0,00	717,1	73,26	0
2	0,04	717,1	73,21	0
3	0,00	717,59	63,88	0
4	0,04	729,26	75,3	0
5	0,00	729,29	58,37	0
6	0,09	732,41	67,17	0
7	0,00	732,41	65,84	0
8	0,04	732,41	63,34	0
9	0,03	732,41	69,56	0
10	0,06	732,42	53,46	0
11	0,04	729,72	50,97	0
12	0,04	727,5	65,29	0
13	0,00	732,48	55,72	0
14	0,00	733,42	57,91	0
15	0,02	734,14	60,12	0
16	0,00	734,15	55,18	0
17	0,00	732,48	55,56	0
18	0,00	732,47	55,21	0
19	0,06	778	71,04	0

ANEXO B

Anexo B.1 - Dados de Registros de Reclamações e Intermitência

A Tabela B.1, refere-se às informações de ligações e economias gerenciadas pelo SAAE de Viçosa – MG. O período de análise (2006-2008), envolveu 12 750 informações, as quais foram associadas os registros de reclamações e intermitência. Apenas parte da tabela será apresentada.

Tabela B.1 Dados de Registros de Reclamações e Intermitência

LIGACAO	HIDROMETRO	CODBAI	CODRUA	NUM	AREA	COORD_X	COORD_Y	BAIRROS	OCOR_FA*	OCOR_RUA**
	0021010023	007	005	00046	85.00	720219.20	7706347.87	ARDUINO BOLIVAR	0	0
H04490	0021010866	030	004	00056	228.00	720436.35	7704074.88	CENTRO	0	0
A02530	0021012303	010	001	00066	57.00	721041.46	7702872.78	BELA VISTA	1	0
B01852	0021029792	020	001	00145	30.00	719925.25	7703936.23	MARIA EUGENIA	0	0
G01512	0021029796	043	002	00102	200.00	722349.95	7705750.58	JOAO BRAZ	0	0
P03944	0021031635	005	079	00288	25.00	719001.20	7701680.66	NOVA VICOSA	0	0
G00762	0021031639	043	006	00033	196.00	722450.12	7706081.78	JOAO BRAZ	0	0
D03940	0021034602	030	064	00158	120.00	720638.31	7702757.83	CENTRO	0	0
A05752	0021034605	030	066	00355	688.00	720928.44	7703797.74	CENTRO	0	0
O04380	0021034608	003	025	00059	2223.60	720292.51	7702574.33	FATIMA	0	0
P02141	0021036831	005	029	00270	30.00	718770.17	7701989.00	NOVA VICOSA	0	0
K00454	0021036832	011	009	00091	40.00	720288.44	7706270.59	COLONIA VAZ DE MELO	0	0
F01602	0021036833	040	022	00028	196.00	721843.88	7707084.69	SILVESTRE	0	0
I00480	0021036836	055	003	00035	94.00	720616.35	7704678.12	JOAO MARIANO	0	0
	0021036885	007	003	00147	110.00	720098.83	7706416.14	ARDUINO BOLIVAR	0	0
A02581	0021036910	010	001	00035	60.00	721037.10	7702849.30	BELA VISTA	0	0
I02130	0021036911	030	036	00715	65.00	720689.21	7704352.17	FUAD CHEQUER	0	0
I02130	0021036911	030	036	00715	65.00	720689.21	7704352.17	CENTRO	0	0
I00390	0021036916	047	004	00121	286.00	720667.26	7704660.87	NOVA ERA	0	1
M04850	0021036917	030	003	00102	85.00	720890.97	7702872.24	CENTRO	0	3
H01110	0021036919	030	036	00553	43.00	720613.48	7704212.01	CENTRO	0	0
H02481	0021036931	030	038	00225	100.00	720283.40	7704117.40	CENTRO	0	0
M04880	0021036933	030	003	00128	96.00	720901.75	7702846.72	CENTRO	0	0
L01784	0021036934	006	040	00087	168.00	721625.53	7704185.49	SANTO ANTONIO	0	0
G00165	0021036935	043	020	00285	268.00	722799.12	7705670.05	JOAO BRAZ	0	0
L04831	0021037121	006	012	00103	76.00	721979.62	7704582.05	SANTO ANTONIO	0	0
B02182	0021037123	030	040	00510	123.00	720033.31	7704065.58	CENTRO	0	0
F00784	0021037125	040	029	00284	60.00	722265.43	7707397.79	SILVESTRE	0	1
H00910	0021037127	030	055	00070	62.00	720468.94	7704185.04	CENTRO	0	0

*Ocorrências de falta de água.

**Ocorrências de problemas do cotidiano na rede

ANEXO C

Anexo C.1 - Dados dos Parâmetros da Qualidade da Água

Na Tabela C.1, encontra-se os dados dos parâmetros da qualidade da água, fornecido pelo SAAE de Viçosa. O valor de cada parâmetro corresponde a média calculada para o período de 2006-2008, associado ao centróide dos logradouros. Foi utilizado para este período 192 amostras. Apenas parte da tabela será apresentada.

Tabela C.1 Dados dos Parâmetros da Qualidade Água.

BAIRROS	LOGRADOUROS	TIPO	CLORO	TURBIDEZ	IQA	pH	COR	FLUOR	C_TOTAIS	C_T*
ARDUINO BOLIVAR	SAO TIAGO	RUA	0.800	0.400	92.250	7.200	5.000	1.100	AUSENTE	0
ARDUINO BOLIVAR	DO CONTORNO	RUA	0.600	0.300	96.800	7.200	3.000	0.900	AUSENTE	0
ARDUINO BOLIVAR	SANTO ANDRE	RUA	0.400	0.600	66.900	6.900	4.000	0.900	PRESENTE	1
ARDUINO BOLIVAR	SAO PAULO	RUA	0.400	0.300	98.000	7.400	5.000	0.700	AUSENTE	0
ARDUINO BOLIVAR	ESPIRITO SANTO	PRACA	0.400	0.500	94.800	7.000	6.000	0.600	AUSENTE	0
ARDUINO BOLIVAR	SAO JUDAS TADEU	RUA	0.600	0.200	89.650	7.100	6.000	0.400	AUSENTE	0
ARDUINO BOLIVAR	SAO TOME	RUA	0.400	0.300	91.400	7.000	7.000	0.500	AUSENTE	0
BARRINHA	JOSE EDMAR AMARAL	RUA	0.500	0.500	96.150	7.100	5.000	0.900	AUSENTE	0
BARRINHA	MARIA GABRIELA DE JESUS	RUA	0.500	0.200	88.650	7.200	1.000	1.300	AUSENTE	0
BARRINHA	ANTONIO AMARAL	RUA	0.600	0.200	99.900	7.000	3.000	0.700	AUSENTE	0
BELA VISTA	DO PINTINHO	RUA	0.900	0.900	95.200	7.400	7.000	0.700	AUSENTE	0
BELA VISTA	CABO TOMAZ	RUA	0.600	0.700	96.300	7.200	5.000	0.800	AUSENTE	0
BELVEDERE	PAULO MARIO DEL GIUDICE	RUA	0.600	0.300	99.950	7.100	2.000	0.700	AUSENTE	0
BELVEDERE	OTAVIO DA SILVA ARAUJO	RUA	0.300	0.300	88.900	7.200	3.000	0.400	AUSENTE	0
BELVEDERE	SEBASTIAO FERREIRA SILVA	RUA	0.700	0.400	93.800	7.000	0.000	0.500	AUSENTE	0
BETANIA	JOAQUIM FRANCISCO DE SOUZA	RUA	0.600	0.500	98.350	7.100	2.000	0.800	AUSENTE	0
BETANIA	MADRE MARIA DAS NEVES	RUA	0.500	0.700	94.950	7.100	5.000	0.800	PRESENTE	1
BETANIA	RIO DOCE	RUA	0.600	0.300	96.700	7.400	1.000	0.600	AUSENTE	0
BOA VISTA	BOA VISTA	RUA	0.700	0.900	81.000	7.300	8.000	1.500	AUSENTE	0
BOA VISTA	PRIMEIRO DE MAIO	RUA	0.400	0.400	97.250	7.500	3.000	0.800	AUSENTE	0
BOM JESUS	JOSE DE CASTRO CARDOSO	AVENIDA	0.600	0.700	94.000	7.400	3.000	1.000	AUSENTE	0
BOM JESUS	NOSSA SENHORA APARECIDA	RUA	0.600	0.700	97.850	7.100	5.000	0.700	AUSENTE	0
BOM JESUS	JOSEFINO FIALHO DE FREITAS	RUA	0.500	0.400	91.700	7.500	7.000	1.100	AUSENTE	0
BOM JESUS	JOAQUIM C. ROCHA DE OLIVEIRA	RUA	0.700	0.900	90.550	7.000	4.000	1.100	AUSENTE	0
BOM JESUS	DOM VICOSO	RUA	0.700	1.300	90.800	7.000	0.000	0.900	AUSENTE	0
BOM JESUS	NOSSA SENHORA DAS GRACAS	RUA	0.700	0.500	99.750	7.100	3.000	0.700	AUSENTE	0
BOM JESUS	GERALDO RIBEIRO	RUA	0.800	0.300	94.900	7.400	3.000	1.000	AUSENTE	0
BOM JESUS	SAO PEDRO	RUA	0.600	0.600	96.500	7.200	6.000	0.800	AUSENTE	0
BOM JESUS	SAO PEDRO	RUA	0.600	0.600	96.500	7.200	6.000	0.800	AUSENTE	0
BOM JESUS	OLIVEIRA	RUA	0.800	0.500	97.900	7.400	1.000	0.800	AUSENTE	0

* Coliformes Totais em representação numérica para espacialização.