

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

FREDERICO MARANGON

**VULNERABILIDADE POTENCIAL À CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS POR ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

**Alfenas/MG
2016**

FREDERICO MARANGON

**VULNERABILIDADE POTENCIAL À CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS POR ANÁLISE MULTICRITÉRIO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL – MG. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: Ronaldo Luiz Mincato

Colaborador: Carlos Wilmer Costa (Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar).

**Alfenas/MG
2016**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Alfenas

Marangon, Frederico

Vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos
subterrâneos por análise multicritério. / Frederico Marangon. --
Alfenas/MG, 2016.
38 f.

Orientador: Ronaldo Luiz Mincato.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade
Federal de Alfenas, 2016.
Bibliografia.

1. Análise ambiental. 2. Análise espacial (Estatística). 3.
Planejamento municipal. 4. Geotecnologia ambiental. I. Mincato,
Ronaldo Luiz. II. Título.

CDD-526

FREDERICO MARANGON

“Vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por análise multicritério”

A Banca julgadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de Pesquisa: Ciências Ambientais.

Aprovado em: 25 de fevereiro de 2016.

Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato

Instituição: UNIFAL - MG

Assinatura:  _____

Prof. Dr. Paulo Henrique de Souza

Instituição: UNIFAL - MG

Assinatura:  _____

Prof. Dr. Sandro Barbosa

Instituição: UNIFAL - MG

Assinatura:  _____

*Dedico este trabalho aos meus pais, Fátima e Júlio Cesar (Dú) e a minha namorada,
Fernanda.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e pela fé que diariamente me concede para trilhar os caminhos dessa vida.

Ao meu orientador e amigo Professor Dr. Ronaldo Luiz Mincato, pelo incentivo, apoio e atenção ao longo desses dois anos como seu orientando de mestrado.

Ao meu amigo e colaborador Carlos Wilmer Costa, pelas orientações e dicas que contribuíram no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus pais, Fátima e Júlio Cesar, pelo carinho, incentivo, paciência e amor.

A minha família, minha tia, meus tios e meus avós.

A Fernanda, minha parceira, uma pessoa especial que me ajudou, incentivou e motivou durante este processo.

Aos meus amigos do Laboratório de Geociências do Instituto de Ciências da Natureza por toda troca de conhecimentos, experiências, colaborações e pela amizade.

Aos meus amigos e sócios da Empresa PISO (Projetos de Intervenção Socioambiental), pelo incentivo, paciência e apoio.

A FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos.

A todos, o meu muito obrigado. De coração!

RESUMO GERAL

Compreender como os processos de expansão das atividades antrópicas acontecem no âmbito municipal é fundamental para direcionar mecanismos de planejamento e ordenamento do território. Pois, o uso incorreto e mal planejado dos recursos naturais causa impactos, diretos e indiretos, na qualidade e quantidade dos recursos hídricos subterrâneos. Quanto ao problema de contaminação deste recurso, a análise do uso e cobertura dos solos integrada às variáveis do meio físico podem contribuir para uma melhor percepção desta questão. Neste trabalho foi elaborada a carta de vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do Município de Alfenas, região do Sul do Estado Minas Gerais, que ocupa 849,97 km². A estrutura metodológica foi calcada na estratégia de análise multicritério com matrizes de decisão e tabulação cruzada que classificaram a vulnerabilidade potencial de contaminação nas seguintes classes: extrema, alta, moderada, baixa e negligenciável. As matrizes foram caracterizadas pelos cruzamentos de atributos do meio físico e antrópicos em Sistema de Informações Geográficas (SIG) com o software ArcGIS[®] 10.3.1. Assim, foi caracterizado que as áreas com potencial moderada e extrema respondem, respectivamente, 51,16% e 23,38%, da área de estudo e devem ser prioritárias para ações de mitigação de suas vulnerabilidades.

Palavras-chave: Análise integrada. Planejamento municipal. Geotecnologia Ambiental.

ABSTRACT

Understand how the processes of expansion of anthropogenic activities take place in the municipal scope is critical to direct the planning mechanisms and regional planning. Yes, the misuse and badly planned natural resources impacts, direct and indirect, in the quality and quantity of groundwater resources. As for the problem of contamination of the resource, use and analysis of soil coverage integrated with variables of the physical environment can contribute to a better understanding of this issue. This work was prepared the charter of potential vulnerability to contamination of groundwater resources of the municipality of Alfenas, southern Minas Gerais State, which occupies 849.97 km². The methodological structure was based on multi-criteria analysis strategy decision matrix and cross-tabulation that rated the potential vulnerability of contamination in the following classes: extreme, high, moderate, low and negligible. The arrays are characterized by intersections of physical environment and man-made attributes in geographic information System (GIS) with the software ArcGIS® 10.3.1. So was that areas with potential moderate and extreme 51.16% respectively, and 23.38% of the study area and should be a priority for mitigation actions of their vulnerabilities.

Keywords: Integrated analysis. Municipal planning. Environmental geotechnology.

SUMÁRIO

PARTE I	11
1 INTRODUÇÃO GERAL	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 PANORAMA DA ÁGUA NO BRASIL	14
2.2 MEIO AMBIENTE E ANÁLISE AMBIENTAL.....	15
2.3 GEOSISTEMAS E A CARTOGRAFIA DE SÍNTESE	16
2.4 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	17
2.5 VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	19
2.6 ANÁLISE MULTICRITÉRIO	19
2.7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	21
REFERÊNCIAS	24
PARTE II	29
ARTIGO: Vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por análise multicritério	30
RESUMO	30
INTRODUÇÃO	30
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
MATERIAIS E MÉTODOS	32
RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
CONCLUSÃO	36
AGRADECIMENTOS	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
Potential vulnerability to contamination of groundwater resources by multi criteria analysis	39
ABSTRACT	39

PARTE I

A parte I desta dissertação apresenta a introdução geral que busca correlacionar alguns conceitos chaves ao objetivo e justificativa de realizar esta pesquisa.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Em função da constante evolução científica e tecnológica, além do crescente aumento da complexidade das questões urbanas, a adoção do conceito de planejamento municipal deve ser mais completo, abrangente e integrado, e envolver aspectos econômicos, sociais, físico-territoriais, ambientais e administrativos.

A utilização de planejamentos integrados, que abrange todos os elementos do sistema, já se mostra uma realidade nos municípios médios e grandes. A concepção de um planejamento interdisciplinar pode ser uma importante ferramenta para se enfrentar as consequências socioeconômicas e ambientais advindas da complexidade das questões urbanas. Com base no princípio da precaução, o conceito de prevenir se torna mais importante do que o conceito de remediar, visto que a prevenção é menos onerosa à sociedade.

Para tanto, o planejamento, no âmbito municipal, não deve se limitar às áreas urbanas, mas deve-se vincular também ao meio rural e à região onde está politicamente inserida. Do ponto de vista dos recursos naturais, ao se planejar o município, nem sempre os recursos estão dentro dos limites municipais, integrando uma ou mais bacias hidrográficas ou ainda regiões mais amplas.

No processo de planejamento urbano e territorial, em qualquer escala de análise, a dimensão ambiental, em muitos casos, não é considerada, o que ocasiona uma série de impactos ambientais. Assim sendo, deve-se compreender o processo global, a interconexão entre os elementos sociais, econômicos e o caráter dinâmico da paisagem. Paisagem esta, que deve ser entendida não por meio da compartimentação, mas, sim, pela conjuntura dialética existente entre seus elementos com a investigação, análise e integração (CEREDA JUNIOR, 2011).

Compreender os processos de expansão multifacetada e multitemporal das atividades antrópicas, nos limites municipais ou em bacias hidrográficas é fundamental nos dias atuais. O uso incorreto e mal planejado dos recursos naturais disponíveis nos sistemas ambientais, em especial,

dos recursos hídricos subterrâneos, tem ocasionado impactos na qualidade e quantidade dos mesmos. Em suma, essa evidência ocorre por três motivos: alteração química, física e biológica provocadas direta e indiretamente pelas atividades agrosilvopastoris no manuseio e tratamento do solo, pelo consumo consuntivo e não-consuntivo desenfreado e, por fim, pela má administração e distribuição deste recurso.

As atividades de planejamento são fundamentais para a perfeita execução de qualquer trabalho e as formas com que o homem age sobre a paisagem seguem o mesmo princípio. Fato que confronta com a realidade brasileira, onde a maioria das cidades foram ocupadas de forma desordenada (IBGE, 2010). Frente a tal realidade, torna-se imprescindível o levantamento das características passadas e atuais do ambiente a fim de estabelecer medidas diretivas para as áreas de estudo.

Para Hirata e Fernandes (2008), os responsáveis pela gestão e planejamento dos recursos hídricos estão cada vez mais conscientes das limitações técnicas, econômicas e de disponibilidade de especialistas para viabilizar a remediação de contaminantes existentes, sobretudo em países desenvolvidos. Esta situação tem mostrado que é muito mais interessante proteger o aquífero do que remediá-lo. Como resultado, tem-se notado a popularização do uso e do próprio desenvolvimento de técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, como uma ferramenta de conhecimento e proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

Para proteger e gerar conhecimento sobre os recursos hídricos subterrâneos presentes em uma determinada região, se faz necessário adotar algumas estratégias, são elas:

“identificar áreas que necessitam de maior atenção ambiental ou atividades que representem maior ameaça à qualidade das águas subterrâneas, com a finalidade de dirigir a elas os recursos técnicos e financeiros de órgãos de controle, em estudos de detalhe e aplicação de programas de monitoramento; a capacidade que a zona não-saturada apresenta de degradação dos contaminantes, uma vez que o conhecimento desta característica pode resultar em redução de custos e das exigências ambientais para a instalação de novas atividades; o controle da ocupação em áreas que são mais sensíveis à contaminação de aquíferos; e a proteção de mananciais importantes que são ou serão utilizados para o abastecimento público” (HIRATA e FERNANDES, 2008 p. 405).

Segundo Spadotto (2014), diversas atividades afetam a quantidade, a qualidade e a potabilidade das águas. Essas atividades, especialmente quando desenvolvidas em áreas onde as

águas subterrâneas estão em condições de maior vulnerabilidade à contaminação, representam uma grande ameaça à qualidade da água, podendo, por consequência, colocar em risco a conservação da biodiversidade, o equilíbrio ecossistêmico e a sobrevivência da espécie humana.

Diante do exposto, a presente dissertação visa, por meio da utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e de uma metodologia pautada na análise multicritério, correlacionar as características do meio físico e dos processos de uso e cobertura do solo por atividades antrópicas para determinar e gerar a carta de vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos no Município de Alfenas, no Sul de Minas Gerais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica é apresentado uma breve discussão e os conceitos gerais relacionados a pesquisa.

2.1 Panorama da Água no Brasil

Em solos brasileiros encontram-se 12 % das reservas de água doce e algumas das maiores bacias hidrográficas do mundo (as bacias hidrográficas dos rios Amazonas, Paraná e São Francisco). A vazão média anual de água chega a 1.180.000 m³ s⁻¹ (ANA, 2014).

A retirada total de água equivalia a apenas 0,9 % do volume total disponível de água doce (2.373 m³ s⁻¹) em 2010. No entanto, as retiradas de água cresceram em quase 30 % nos últimos cinco anos, refletindo tanto o crescimento populacional quanto o desenvolvimento econômico. Cerca de 50 % da água captada é efetivamente consumida, ou seja, não volta para o ciclo hidrológico (ANA, 2013). O balanço entre a oferta e o consumo de água é relativamente estável na maioria das regiões do país, exceto nas áreas do semiárido nordestino. Em 2010, considerou-se crítico ou muito crítico o balanço entre oferta e consumo em 17 % das fontes de água doce do Brasil (ANA, 2014).

Da retirada total de água no Brasil, a agricultura participa com 54 % da captação, o abastecimento humano com 25 % e a indústria com 17 % (ANA, 2014). Tais participações diferem entre as regiões, refletindo as diferenças nos padrões climáticos e socioeconômicos regionais. As perdas na distribuição de água urbana atingiram 36,9 % em 2012. O consumo doméstico médio de água *per capita* era de 167,5 L dia⁻¹, variando de 131,2 na região Nordeste a 194,8 L dia⁻¹ na Sudeste (SNIS, 2012).

A descarga de efluentes domésticos é o principal problema que afeta a qualidade das águas superficiais (MMA, 2008), pois apenas 48% dos esgotos domésticos são coletados e 39% são tratados (IBGE, 2010). Todavia, há outros poluidores da água em todas as regiões hidrográficas e

incluem os efluentes industriais, de mineração, descargas difusas de drenagem do solo urbano e agrícola, e a disposição de resíduos sólidos.

Em partes do Sul e Sudeste do país, a enorme descarga de água servida, urbana e industrial, prejudica a qualidade da água. O conjunto dos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, maior polo da economia industrial do Brasil, estão enfrentando escassez quantitativa e qualitativa de água. Apenas 72 % das pessoas dizem estarem satisfeitas com a qualidade da água, uma média muito inferior à estabelecida pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômica (OCDE), de 81% (SNIS, 2012).

Em Minas Gerais, a Política Estadual de Recursos Hídricos (Lei nº 13.199/1999) e o Decreto nº 41.578/2001 são os documentos que estabelecem diretrizes e deveres para gerenciar os recursos hídricos e ações que garantam seu uso racional e planejado, sejam eles superficiais ou subterrâneos.

2.2 Meio Ambiente e Análise Ambiental

Entende-se por meio ambiente tudo aquilo que está em nossa volta. O meio ambiente na verdade não é metade. O meio ambiente é o ambiente. Consiste num determinado espaço, onde ocorrem as interações entre a fauna, a flora, os elementos abióticos (ar, água e ar) e bióticos-abióticos como os solos por exemplo.

A ciência ambiental, é o campo científico responsável por analisar, identificar, caracterizar e divulgar os processos sistêmicos que ocorrem na natureza. Estudar a natureza nos remete a pensá-la como um todo, de uma forma holística, onde todos os elementos estejam integrados em dinâmicas heterogêneas.

A natureza também se difere de um lugar para o outro. As variações climáticas, topográficas, geológicas, pedológicas causam heterogeneidades de grande escala. A Geografia é a ciência que transversa entre essas variações. Por seu objeto de estudo ser exatamente o espaço, o tempo, a sociedade e a natureza, a ciência geográfica aproxima o humano do natural, e não o desvincula, tornando-o parte fundamental em suas análises.

A paisagem alterada é um espaço produzido, cujo relevo serve de suporte físico, em que as diferentes formas de ocupação refletem o momento histórico, econômico e social. Portanto, o relevo

e seu modelado representam o fruto da dinamicidade entre os processos físicos e os agentes sociais, que ocorrem de modo contraditório e dialético a partir da análise integrada das relações processuais de uma escala de tempo geológica para a escala histórica humana (JORGE, 2011).

A modificação diversificada, acelerada e agressiva, da natureza pelo homem fornece elementos para defesa da proposta de um novo período de geológico, o Quinário ou Tecnógeno. Segundo Carpi Júnior (2001), “*de uma nova fase ecológica de desenvolvimento do homem*”, tamanha as modificações e interferências que o conjunto de ações antrópicas desenvolveu ao longo de sua evolução.

Na ciência geográfica, em especial, na área de concentração da geografia física, o levantamento bibliográfico e o intercâmbio entre atividades de campo com práticas laboratoriais, comumente voltados para exploração e interpretação dos dados das variáveis socioambientais (geológicas, pedológicas, topográficas, de uso e cobertura, entre outros), exigem a organização e a sistematização das etapas consubstanciadas por metodologias de estudos. Essa exigência, segundo Oliveira e Riedel (2012), culmina na adoção de procedimentos metodológicos organizacionais para a delimitação do campo de abrangência das atividades propostas.

Para o entendimento deste complexo processo, a análise ambiental, torna-se, assim, indispensável à necessidade de se (re) conhecer o ambiente em que se vive e, assim, ser possível propor planejamento e manejo do uso do solo, principalmente em ambiente urbano (CEREDA JUNIOR, 2011).

2.3 Geossistemas e a Cartografia de Síntese

O mapeamento temático municipal e ambiental, aqui estruturado na Cartografia de Síntese, é uma ferramenta importante para integrar e analisar dados geográficos diversificados. A sobreposição de mapas por meio de procedimentos lógicos e computacionais auxiliam no processo decisório dos gestores.

Com o advento da Teoria Geral dos Sistemas (TGS) proposta por Bertalanffy, na década de 1950, sistematizou-se uma concepção integrada da realidade. A partir da TGS, os Geossistemas foram conceituados pelo russo Sothava em 1962. A abordagem geossistêmica possibilitou a

Geografia Física estruturar diversos modelos metodológicos e conceituais, morfológicos e de classificação dos sistemas, sendo a maioria deles representados por propostas de cartografia, e esta, de síntese (MARTINELLI, 2005).

Bertalanffy (2013) propõe um certo número de exigências de uma TGS. Para essa dissertação, enumeramos algumas exigências empíricas que coincidem com a temática proposta, são elas: 1) a teoria da decisão, que analisa de igual para igual as escolhas baseadas no exame de determinada situação, neste caso a vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos; 2) a análise fatorial, isto é, identificação do potencial por meio de uma metodologia geoestatística, onde existem múltiplas variáveis, nos campos das ciências ambientais. 3) a TGS *stricto sensu* procura derivar da definição geral de sistema, como um complexo de componentes em interação com conceitos característicos das totalidades organizadas, tais como interação, soma, mecanização, centralização, etc., aplicados a fenômenos concretos.

Os geossistemas, na definição de Martinelli e Pedrotti (2001), constituem um constructo teórico visto como unidade dimensional ideal que abarca a integridade da realidade concreta, um espaço que hoje se confunde com o meio técnico-científico-informacional.

Desta forma, como pontua Martinelli e Pedrotti (2001), na cartografia de síntese os elementos não estão mais em simples superposição ou em justaposição, mas fundidos em tipos – por exemplo as unidades taxonômicas. Constituem-se assim, conjuntos espaciais que são agrupamentos de lugares caracterizados por integração de atributos ou variáveis, ou seja, sistemas lógicos.

2.4 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

O SIG nada mais é do que um conjunto de ferramentas (software e hardware) que possibilitam aos usuários realizar análises geográficas espaciais acerca de um determinado fenômeno. Em tempo real, este sistema permite que grandes quantidades de dados oriundos de diversas fontes sejam transformados e tratados de acordo com a proposição de cada pesquisador.

Câmara e Davis (2001) conceituam o SIG como “ferramentas computacionais para geoprocessamento, que permitem realizar análises complexas, ao integrar dados e ao criar banco de

dados georreferenciadas; tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos”.

Tomlinson (2007) argumenta que os SIG resistem a uma definição simplista pelo fato de serem uma tecnologia particularmente horizontal com um largo espectro de aplicações nos setores industrial e acadêmico. Esta tecnologia apresenta um modelo holístico de um SIG funcional no qual os dados são analisados e transformados em informação útil. Fica evidente que a tecnologia SIG é horizontalizada a vários campos do conhecimento. Segundo Gomes (2008), não constitui um fim em si mesmo e mais que um conjunto de ferramentas para tratar um tipo espacial de informação, a informação geográfica, é um ambiente de solução de problemas.

Para Moura (2014), em vez de simplesmente descrever elementos ou fatos, os modelos de análise espacial desenvolvidos em SIG podem traçar cenários, simulações de fenômenos, com base em tendências observadas ou julgamentos de condições estabelecidas. Portanto, o uso e aplicação de SIG está relacionado à seleção de variáveis de análise e o estudo de suas combinações.

Benavides Silva e Machado (2014) definem o SIG como uma das técnicas, atualmente também considerada como uma ciência espacial, mais completas e amplas do Geoprocessamento. Essa técnica permite trabalhar, segundo os autores, de maneira integrada abordagens de várias áreas do conhecimento para adequar e automatizar o armazenamento, tratamento e manipulação de grande quantidade de informações espaciais.

Surgem, então, diversas propostas metodológicas operacionais apoiadas nas técnicas de geoprocessamento em SIG capazes de sintetizar informações geográficas a partir de seus atributos ou variáveis. Dentre as aplicações do SIG na análise ambiental pode-se citar, o mapeamento temático, diagnóstico ambiental, avaliação de impacto ambiental, ordenamento e gestão territorial e prognósticos ambientais.

Face a essa realidade, vem aumentando numericamente o interesse pela cartografia de síntese sob a perspectiva da vulnerabilidade. A identificação de áreas vulneráveis, apoiadas pelas ferramentas de SIG, nas quais as características do meio físico e o uso e cobertura do solo apresentem perigo de contaminação ao recurso hídrico subterrâneo, é indispensável para o estabelecimento de ações prioritárias ao planejamento territorial e ambiental sustentável (OLIVEIRA, 2013).

2.5 Vulnerabilidade à Contaminação dos Recursos Hídricos Subterrâneos

É crescente a preocupação com os processos de degradação do meio ambiente. No que concerne aos recursos hídricos subterrâneos, esta preocupação se desdobra a medida em que reconhecem que os processos de remediação são complexos e onerosos.

O conceito de contaminação de aquíferos é compreendido por Hirata e Fernandes (2008) como sendo a degradação das águas subterrâneas, ocasionada pela perda de qualidade da água potável, isto é, quando esta apresenta níveis de concentração de substâncias nocivas superiores aos padrões de qualidade estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

A contaminação dos aquíferos tem se tornado um dos problemas mais preocupantes nas questões de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, visto que são considerados reservatórios estratégicos para a humanidade. Para contornar esse problema são adotadas, em várias partes do mundo, principalmente nos países mais desenvolvidos, medidas preventivas, pois uma vez contaminado, a recuperação do aquífero é extremamente difícil e onerosa. No entanto, para adotar medidas preventivas é necessário conhecer a vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, o que torna a aplicação de métodos de avaliação de vulnerabilidade uma prática comum e de grande contribuição (CUTRIM e CAMPOS, 2010; COSTA *et al*, 2015).

O termo vulnerabilidade é definido como a susceptibilidade intrínseca do meio aquífero em ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica. Este termo recebe vários adjetivos de acordo com Hirata e Fernandes (2008), são eles: vulnerabilidade relativa (as unidades de um mapa de vulnerabilidade são classificadas uma com relação à outra e não possuem significado absoluto); vulnerabilidade absoluta (cada unidade mapeada possui um significado em si, ou seja, cada índice de vulnerabilidade seria associado à capacidade de degradação de um contaminante); vulnerabilidade geral ou universal (dirige-se a todos as atividades ou classes de contaminantes) e; vulnerabilidade específica (volta-se a um certo contaminante ou ainda atividade ou classe de contaminantes).

2.6 Análise Multicritério

Os processos de tomada de decisão, geralmente, visam satisfazer a vários objetivos com base na avaliação de um ou mais critérios ou variáveis. Logo, a combinação e a avaliação destes critérios se fazem necessárias, sendo os procedimentos para fazê-lo denominados análise ou avaliação multicritério (AMC).

Dentro deste tipo de avaliação, mostra-se relevante a questão do risco, visto a necessidade de avaliar diferentes aspectos (a favor ou contra) nos processos de decisão, os quais contribuem para alavancar as opções de gestão e planejamento do espaço dentro de um determinado contexto (CEREDA JUNIOR, 2014).

O procedimento de análise de multicritérios baseia-se no mapeamento de variáveis por plano de informação e na definição do grau de pertinência de cada plano e de cada um de seus componentes de legenda para a construção do resultado final, utilizando-se fatores de ponderação sempre que necessário (MOURA, 2014). Esta técnica tem sido empregada em diversos estudos relacionados ao planejamento ambiental, devendo ser utilizada em situações nas quais a análise de apenas uma variável não representa a realidade do fenômeno estudado (SANTOS, 2010).

Zuffo et al. (2002) testaram cinco métodos de análise multicriterial para auxílio à tomada de decisão em planejamento de recursos hídricos: método da Programação por Compromisso (PC), método da Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT); método Analítico Hierárquico (AHP) e outros dois métodos baseados nas relações hierárquicas (Electre II e Promethee II). Ao concluir, Zuffo *op. cit* mostraram que as metodologias adotadas responderam positivamente e que quatro dos cinco métodos testados apresentaram respostas cartográficas semelhantes (PC, CGT, AHP e Promethee II).

Ribeiro (2014) utilizou a abordagem de múltiplos critérios em SIG, com o Processo Analítico Hierárquico (AHP), para classificar a vulnerabilidade ambiental da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu a processos erosivos hídricos.

Machiwal e Jha (2015), Valle Junior *et al.* (2015) e Ducci e Sellerino (2014) são exemplos de pesquisas internacionais que utilizam análises estatísticas multicritérios para identificar fenômenos concretos em ciências ambientais. Os três autores propõem métodos baseados na AMC para identificar a vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.

Meira *et al.* (2014) utilizaram os métodos GOD (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table) e POSH (acrônimo em inglês de *Pollutant Origin*,

Surchage Hydraulically) De acordo com os autores, os métodos possuem simplicidade conceitual e também demandam de bases que são, até certo ponto, acessíveis. O método GOD foi utilizado para avaliar a vulnerabilidade à contaminação em três classes: baixa, moderada e alta. E, com a utilização do método POSH, os autores classificaram as fontes potenciais de contaminação antrópica, definidas como: não existente, reduzida, moderada e elevada.

Em função do exposto, verifica-se que a espacialização da análise ou avaliação multicritérios em SIG pode ser útil no planejamento ambiental em áreas que apresentem vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos ou impactos ambientais deletérios ao meio ambiente.

2.7 Caracterização da Área de Estudo

O Município de Alfenas, localizado no Sul de Minas Gerais (Figura 1), está inserido em uma área de 849,97 km² com população estimada em 78.712 habitantes (IBGE, 2015). Está praticamente equidistante das três principais regiões metropolitanas do Brasil: São Paulo, Belo Horizonte e Rio de Janeiro. É importante frisar que essa equidistância entre os três principais centros econômicos do país favorece geograficamente a região Sul de Minas Gerais.

A área de estudo está localizada no planalto Sul de Minas ou Alto Rio Grande (AB'SABER, 1975), com altitudes de 760 a 960 m, representada pelo relevo de colinas e morros (ALFENAS, 2006). A região é caracterizada pela transição entre o Cerrado (savana brasileira) e a Mata Atlântica (BRASIL, 1962), com apenas pequenos fragmentos de vegetação natural remanescentes. A agropecuária contribui com cerca de 15% do produto interno bruto (PIB) do Município (IBGE, 2012).

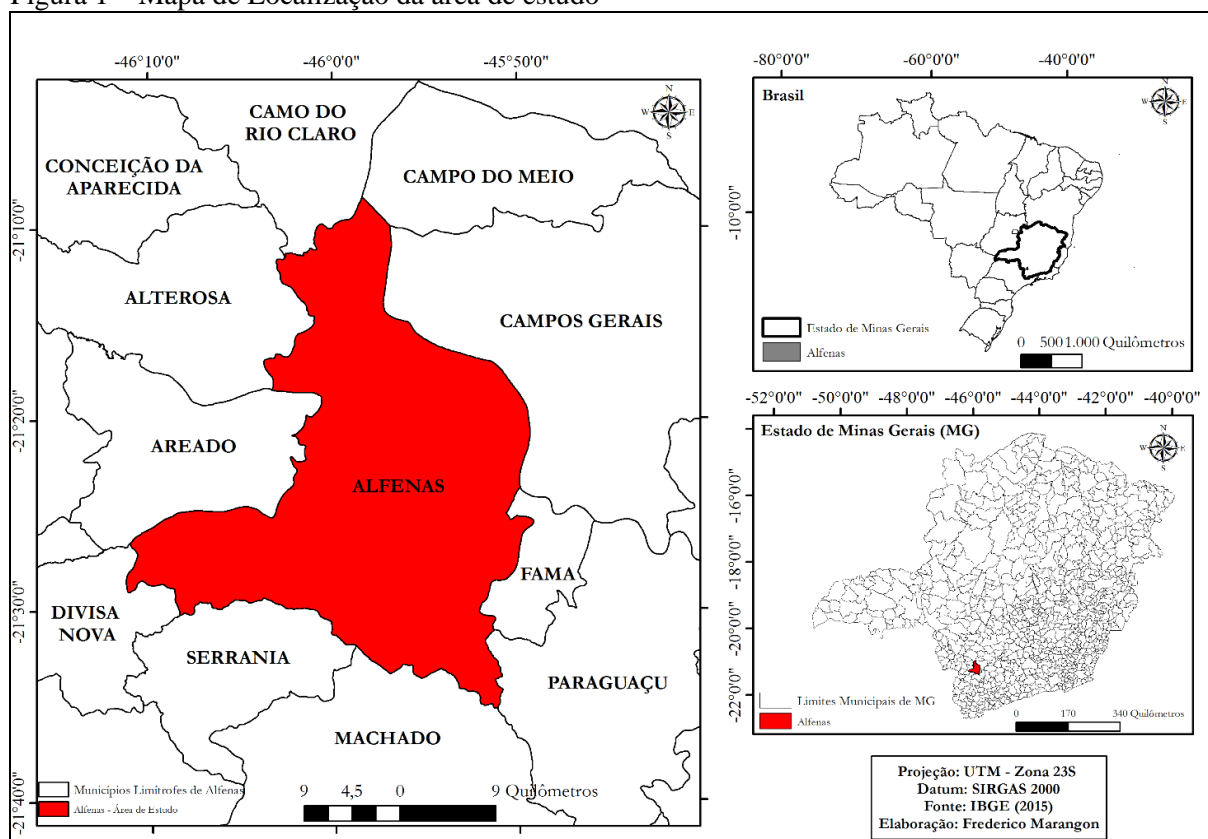
Carvalho et al. (2008) apresentaram as classificações climáticas por regionais do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) segundo o indicador climático de Thornthwaite (1948) no Zoneamento Ecológico Econômico do Estado de Minas Gerais. O Clima de acordo com a classificação de Köppen é o tropical mesotérmico (CwB) (SPAROVEK et al, 2007).

O arcabouço geológico da área é formado por gnaisses charnoquíticos e granulíticos polimetamórficos, de idades pré-cambrianas (HASUI, 2010). Possui domínios hidrogeológicos

complexos, com cinco unidades geológicas de características distintas: Grupos Andrelândia e Carrancas e os Complexos Campos Gerais, Varginha-Guaxupé e Lavras (CPRM; UFRJ, 2010).

O Grupo Andrelândia (NPax e NPag), conforme Fupai (2013), é caracterizado como uma unidade de rochas metassedimentares diversificadas, tendo na base quartzitos, seguidos por granada xistos feldspáticos, leptinitos e mármore. No Município de Alfenas, afloram dois tipos de litofácies do Grupo Andrelândia (PERTERNEL; TROW; SCHMITT, 2005).

Figura 1 – Mapa de Localização da área de estudo



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015.

O primeiro corresponde a associação de litofácies basais, posicionada discordantemente, por falhas de empurrão, sobre ortognaisses do embasamento e constituída por biotita gnaisses de granulometria fina e laminação delgada. O segundo está assentado concordantemente sobre os biotita gnaisses, sendo composto por sucessões quartizíticas e intercalações subordinadas de quartzo-muscovita xistos.

O Grupo Carrancas (NPcgx), segundo a Fupai (2013), é uma sequência alóctone dominada por rochas metapsamíticas que gradam, para o topo, para mica-grafita xisto. Este grupo é admitido

como oriundo da margem passiva Neoproterozoica da borda meridional da Placa Sanfranciscana (RIBEIRO *et al.* 1995).

As unidades do Complexo Varginha-Guaxupé que afloram no município são a Granulítica Basal (NPvg), a Ortognáissica Migmatítica Intermediária (NPvog) e a Paragnáissica Migmatítica Superior (NPvm). A primeira constituída por enderbito, granulito e granulito máfico de composição básica, enquanto que a segunda é constituída por anatexito, gnaiss granítico, migmatitos estromáticos e gnaiss tonalítico. A terceira unidade, por sua vez, é constituída por paragnaisses, mica xistos e biotita gnaisses. (FUPAI, 2013).

Os terrenos arqueanos dos Complexos Lavras (A3la) e Campos Gerais (A3cg), segundo Fupai (2013), pertencem ao Domínio Gnáissico-Migmatítico Arqueano da região Sudeste do Brasil, representado por corpos de grande expressão espacial e intensamente deformados por eventos tectônicos posteriores. São constituídos por litologias muito antigas, tais como ortognaisses tonalíticos, graníticos, migmatíticos e anfíbolitos.

As sete classes de solos do local são caracterizadas por apresentar as seguintes formações classificadas por UFV *et al.* (2010) atualizada com base em Brasil (1962): LVd2 – LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado textura argilosa, LVd3 – LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A fraco/moderado textura argilosa + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A fraco/moderado textura argilosa, LVAd1 – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa, LAd1 – LATOSSOLO AMARELO distrófico húmico textura argilosa + LATOSSOLO AMARELO distrófico típico A proeminente textura argilosa, PVd1 – ARGISSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado/fraco textura média/argilosa, PVAe2 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico A moderado textura média/argilosa e GMd4 - GLEISSOLO MELÂNICO distrófico típico A proeminente textura argilosa + NEOSSOLO QUARTZARÊNICO hidromórfico A moderado + ORGANOSSOLOS HÁPLICO sáprico típicos e terriços; todos fase campestre, relevo plano.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. **Formas de relevo**: texto básico. São Paulo: Edart, 1975. 80p.

ALFENAS. Prefeitura municipal de Alfenas. **Plano Diretor de Alfenas**: leitura técnica, em processo de revisão, Alfenas, Minas Gerais, 2006. 189p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de referência**: diálogo político OCDE/Brasil sobre Governança da Água, Brasília, Distrito Federal, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos 2013**. Brasília, Distrito Federal, 2013.

BARBARA, K. **Small Wonder: essays**. New York: National Bestseller. 2002. 269p.

BERTALANFFY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas**: fundamentos, desenvolvimento e aplicações. 7. ed. Petrópolis: Vozes. 2013. 359p.

BENAVIDES SILVA, V. C., MACHADO, P. S. SIG na Análise Ambiental: Susceptibilidade Erosiva da Bacia Hidrográfica do Córrego do Mutuca, Nova – Lima – Minas Gerais. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 31, n. 2, p. 66-87, 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos da região sob influência do reservatório de Furnas**. Boletim Técnico n. 13 do Serviço Nacional De Conservação dos Solos. Rio de Janeiro: Brasil, 1962. 462 p.

CARPI JÚNIOR, S. **Processos erosivos, Recursos Hídricos e Riscos Ambientais na Bacia do Rio Mogi Guaçu**. 2001. 230f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP, Rio Claro, 2001.

CARVALHO, L. G et al. **Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais**: componentes geofísico e biótico. Lavras: UFLA. 2008. 161p.

CÂMARA, G.; DAVIS, Jr., C. A. Definições de Geoprocessamento: conceitos básicos de um SIG. Apresentação do livro. In: CÂMARA, G.; DAVIS JR., C. A.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. INPE, 2001. p. 1-5. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>>. Acessado em: 25 Maio 2012.

CEREDA JUNIOR, A.; RÖHM, S. A. Analysis of Environmental Fragility Using Multi-Criteria Analysis (MCE) for Integrated Landscape Assessment. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 8, n. 1, p. 28-37, april, 2014.

CEREDA JUNIOR, A. **Análise de fragilidade ambiental com métodos multicritério – críticas e proposta metodológica**. 2011. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, UFSCar, São Carlos. 2011.

COSTA, W. C. et al. Potencial de Contaminação de Aquíferos da Bacia do Ribeirão do Meio – Município de Leme – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20, n. 1, p. 218-225, Jan./Mar., 2015.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINEIRAIIS (CPRM); UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO DE JANEIRO (UERJ). **Cartas Geológicas do Programa de Geologia do Brasil**. Folhas Geológicas de Alpinópolis (SF-23-V-B-IV), Machado (SF-23-V-D-V), Alfenas (SF-23-V-D-II), Guapé (SF-23-V-B-V), Campo Belo (SF-23-V-B-VI), Nepomuceno (SF-23-V-D-III) e Varginha (SF-23-V-D-VI). Escala: 1:100.000. Brasília: CPRM. 2010.

CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G.; Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos god e posh. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 29, n. 3, p. 401-411, 2010.

DUCCI, D.; SELLERINO, M. Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers. **Sci. Total Environmental**, v. 447, p. 315-322, 2013.

FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO À INDÚSTRIA (FUPAI) – **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno do Lago de Furnas: Relatório 1 – Diagnóstico da Bacia Hidrográfica**. Itajubá, MG, 2013. p. 305.

GOMES, F. E. M., Geoprocessamento em ambiente SIG aplicado à hidrogeologia. In: Feitosa, F. A. C (org.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812p.

HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do Sudeste Brasileiro e a estruturação regional. **Geociências**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 141-169, 2010.

HIRATA, F.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: Feitosa, F. A. C (org.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS. **Estimativas da População Residente nos Municípios Brasileiros com Data de Referência em 1º de julho de 2015**. 2015. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_dou_2015_20150915.pdf>. Acesso em: 21 de Junho 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção Agrícola Municipal**, Rio de Janeiro, v.40, p. 1-102, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo demográfico 2010**, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <www.censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 Maio 2014.

JORGE, M.C.O. Geomorfologia Urbana: Conceitos, Metodologias e Teorias. In: **Geomorfologia Urbana**. GUERRA, A.J.T.; (org). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2011. 277p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, Ministério das Cidades, Brasília, Distrito Federal, 2012.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. **Regional Studies**. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581814000470>>. Acesso em: 12 Fevereiro 2015.

MARTINELLI, M.; PEDROTTI, F. “A cartografia das unidades de paisagem: questões metodológicas”. **Revista do Departamento de Geografia**, USP, v. 14, 2001, p. 39-46.

MARTINELLI, M. A cartografia de síntese na geografia física. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2005, São Paulo. **Anais ... USP**, 2005. p. 3561-3570.

MEIRA, J. C. R., DE-CAMPOS, A. B., PEREIRA, L. C. Vulnerabilidade natural e perigo à contaminação de zona de recarga do aquífero guarani. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 1. p. 31-46, 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Mudança Climática**, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, Distrito Federal, 2008.

MOURA, A. C. M. Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 312 p.

RIBEIRO, A. **Vulnerabilidade Ambiental da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Mandu, Sul de Minas Gerais**. 2014. 61f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Tecnologia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Tecnologia Ambiental, UNIFAL-MG, Alfenas, 2014.

PETERNEL, R.; TROUW, R. A. J.; SCHMITT, R. S. Interferência entre duas faixas móveis Neoproterozoicas: O caso das Faixas Brasília e Ribeira no Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 3, n. 35, p. 297-310, 2005.

RIBEIRO, A.; ANDREIS, R. R.; TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; VALENÇA, J. G. Evolução das bacias proterozóicas e o termo-tectonismo brasileiro na margem sul do Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 4, p. 235-248, 1995.

SANTOS, A. A. **Geoprocessamento aplicado à identificação de áreas de fragilidade ambiental no parque estadual da Serra do Rola Moça**. 2010. 39f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento). Instituto de Geociências, UFMG, Belo Horizonte, 2010.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, Ministério das Cidades, Brasília, Distrito Federal, 2012.

SPADOTTO, C. A. **Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação – VIX**. Campinas-SP: Embrapa Gestão Territorial, 2014. 3p. (Embrapa Gestão Territorial. Comunicado

Técnico, 2). Disponível em: <<https://www.embrapa.br/gestao-territorial/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003510/indice-de-vulnerabilidade-de-agua-subterranea-a-contaminacao---vix>>. Acesso em: 12/02/2015.

SPAROVEK, G. et al. Computer assisted Köppen climate classification: case study for Brazil. **International Journal of Climatology**. v. 27, n. 2, p. 257-266, 2007.

OLIVEIRA, A. I. L.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. A. Modelagem da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos livres em região hidrográfica do semiárido baiano explorada pela agroindústria. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais ... INPE**, 2013, p. 6214- 6221.

OLIVEIRA, T. A.; RIEDEL, P. S. Os quatro níveis da pesquisa geográfica aplicados à organização e sistematização de atividades envolvidas na compartimentação de terrenos. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 1, n. 4, p. 69-77, 2012.

TOMLINSON, R. **Thinking about: geographic information system planning for managers: GIS**. Three ed. California: ESRI Press, 2007. 238p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV); FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS (CETEC); UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS (UFLA) e FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (FEAM). **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte. Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49 p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-deminas-gerais>>. Acesso em: 03 de junho de 2014.

VALLE JUNIOR, R. F., VARANDAS, S. G. P., FERNANDES, L. F. S., PACHECO, F. A. L. Multi Criteria Analysis for the monitoring of aquifer vulnerability: A scientific tool in environmental policy. **Environmental Science & Policy**, v. 48, p. 250-264, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146290111500012X>>. Acesso em 12/02/2015.

ZUFFO, A. C.; REIS, L. F. R.; SANTOS, R. F.; CHUDHRY, F. H. Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 7, n. 1, p. 81-102, Jan./Mar, 2002.

PARTE II

ARTIGO: Vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por análise multicritério.

AUTORES: Frederico Marangon, Carla Mourão, Carlos Wilmer Costa e Ronaldo Luiz Mincato.

Artigo submetido à Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)

Vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por análise multicritério

RESUMO

A compreensão dos processos de expansão das atividades antrópicas no planejamento municipal é fundamental nos dias atuais. Pois, o uso incorreto e mal planejado dos recursos naturais causa impactos, diretos e indiretos, na qualidade e quantidade dos recursos hídricos subterrâneos. Quanto ao problema de contaminação deste recurso, a análise do uso e cobertura dos solos integrada às variáveis do meio físico podem contribuir para uma melhor percepção desta questão. Neste trabalho foi elaborada a Carta de Vulnerabilidade Potencial à Contaminação dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Município de Alfenas, região do Sul do Estado Minas Gerais, que ocupa 849,97 km². A estrutura metodológica foi baseada na estratégia de análise multicritério com matrizes de decisão e tabulação cruzada que classificaram a vulnerabilidade potencial de contaminação nas seguintes classes: extrema, alta, moderada, baixa e negligenciável. As matrizes são caracterizadas pelos cruzamentos de atributos do meio físico e antrópicos em Sistema de Informações Geográficas (SIG) com o software ArcGIS® 10.3.1. Assim, foi caracterizado que as áreas de vulnerabilidade potencial moderada e extrema respondem, respectivamente, 51,16% e 23,38%, da área de estudo e devem ser prioritárias para ações de mitigação de suas vulnerabilidades potenciais.

Palavras-chave: *Análise integrada, planejamento municipal, Sistema de Informação Geográfica (SIG).*

¹ INTRODUÇÃO

² As alterações do ambiente natural que a
³ humanidade tem provocado, ao longo da história apontam
⁴ para o agravamento continuado da situação ambiental.
⁵ Exemplos brasileiros recentes são os casos do “Desastre
⁶ de Mariana” que atingiu a Bacia Hidrográfica do Rio Doce
⁷ em Minas Gerais e no Espírito Santo e alcançou o Oceano
⁸ Atlântico, a seca extrema no Nordeste, a crise hídrica no
⁹ Sudeste, o desmatamento e as queimadas no Norte e as
¹⁰ enchentes no Sul.

¹¹ Neste cenário, os recursos naturais, em especial
¹² os hídricos subterrâneos são estratégicos para a
¹³ humanidade, cujo uso incorreto e mal planejado tem
¹⁴ causado impactos na qualidade e na quantidade dos
¹⁵ mesmos. Além da distribuição irregular, tais impactos são
¹⁶ verificados nas alterações das propriedades químicas,
¹⁷ físicas e biológicas das águas subterrâneas pelas atividades
¹⁸ antrópicas nas áreas rurais e urbanas.

¹⁹ Nas áreas rurais ocorrem impactos difusos,
²⁰ devido, principalmente, às atividades agropecuárias
²¹ intensivas e pontuais ou locais pela disposição imprópria
²² de resíduos e pela falta de saneamento básico. Nas áreas
²³ urbanas, os impactos são pontuais e devidos ao despejo
²⁴ clandestino de efluentes de atividades industriais e de
²⁵ serviços e carência e ou ausência de serviços de coleta e
²⁶ tratamento de esgotos e disposição de resíduos em lixões.
²⁷ Todavia, a preocupação com a poluição das águas
²⁸ subterrâneas é limitada no Brasil, pois o usuário do recurso
²⁹ subterrâneo desconhece a importância e ignora as graves
³⁰ consequências de sua contaminação. Isto, decorre do fato
³¹ que, ao contrário da contaminação das águas superficiais,

³² identificada na maioria das vezes, a contaminação das
³³ águas subterrâneas não é visível e a exploração é muito
³⁴ distribuída, o que dificulta a identificação do problema.
³⁵ Em geral, quando a contaminação fica perceptível, a
³⁶ mesma já atingiu uma vasta extensão (RIBEIRO et al.,
³⁷ 2007). Além disso, muitos compostos originados das
³⁸ diversas atividades potencialmente poluidoras são
³⁹ transformados em outros materiais e inseridos no ciclo
⁴⁰ hidrológico por processos naturais e antrópicos que
⁴¹ podem modificar as características hidrogeoquímicas no
⁴² sistema (COSTA et al., 2015).

⁴³ Diante da atual e emergente crise hídrica, é
⁴⁴ fundamental a realização de estudos, como os de Costa et
⁴⁵ al. (2015), que busquem compreender possíveis riscos de
⁴⁶ contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por
⁴⁷ resíduos provenientes de diversas atividades humanas.

⁴⁸ Sob o enfoque da vulnerabilidade e/ou fragilidade
⁴⁹ dos sistemas ambientais, muitos trabalhos adotam
⁵⁰ metodologias diversas em áreas de estudo diferentes.

⁵¹ Löbler, Terra e Silva (2014) utilizaram o sistema
⁵² GOD (*Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated*
⁵³ *zone, Depth to the water table*) para avaliar a vulnerabilidade no
⁵⁴ Município de Nova Palma, situado na borda da Bacia
⁵⁵ Sedimentar do Paraná, na região central do Estado do Rio
⁵⁶ Grande do Sul. Cereda Junior e Röhm (2014) compararam
⁵⁷ metodologias multicritério para avaliar a fragilidade
⁵⁸ ambiental na bacia do Rio Monjolinho no Município de
⁵⁹ São Carlos - SP. Löbler et al. (2013) levantaram pontos
⁶⁰ potenciais de contaminação e vulnerabilidade natural das
⁶¹ águas subterrâneas do Município de Restinga Seca – RS.
⁶² Cutrim e Campos (2010) avaliaram a vulnerabilidade e

¹ perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de
² Rondonópolis - MT.

³ Assim, a representação da vulnerabilidade dos
⁴ recursos hídricos subterrâneos demanda ilustrar
⁵ graficamente e em escala adequada, as características do
⁶ meio físico e das atividades humanas exercidas num
⁷ contexto geoespacial. Para tanto, a utilização do Sistema de
⁸ Informação Geográfica (SIG), fundamentado em técnicas
⁹ de análise multicritério com matrizes de decisão e
¹⁰ tabulação cruzada é o método mais eficaz para testar a
¹¹ hipótese desta pesquisa. Como por exemplo, Machiwal e
¹² Jha (2015), Ducci e Sellerino (2014), Santos *et al* (2012),
¹³ entre outros.

¹⁴ Assim, este trabalho elaborou uma proposta de
¹⁵ carta de vulnerabilidade potencial à contaminação dos
¹⁶ recursos hídricos subterrâneos no Município de Alfenas,
¹⁷ região Sul de Minas Gerais, por meio da análise
¹⁸ multicritério, na escala 1:250.000.

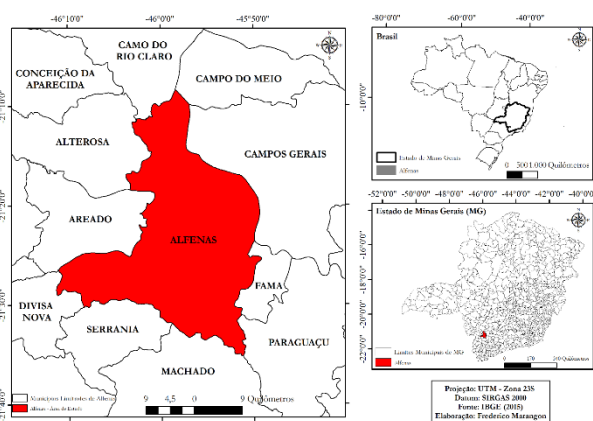
¹⁹ CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

²⁰ O Município de Alfenas está localizado na região
²¹ sul do Estado de Minas Gerais (Figura 1), praticamente
²² equidistante das três principais regiões metropolitanas e,
²³ consequentemente, econômicas do país: São Paulo a 360
²⁴ km, Rio de Janeiro a 462 km e Belo Horizonte a 372 km. A
²⁵ população estimada é de 78.712 mil habitantes (IBGE,
²⁶ 2015).

²⁷ O município está geograficamente inserido na
²⁸ Unidade de Gestão GD3 que consiste em uma sub-bacia
²⁹ da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, com uma área de
³⁰ 849,97 km².

³¹ O clima, de acordo com a classificação de
³² Köppen, é o tropical mesotérmico (CwB) (SPAROVEK;
³³ LIER; DOURADO NETO, 2007).

³⁴



³⁵ **Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo**

³⁶ A área de estudo está localizada no planalto Sul
³⁷ de Minas ou Alto Rio Grande (AB'SABER, 1975), com
³⁸ altitudes de 760 a 960 m, representada pelo relevo de
³⁹ colinas e morros (ALFENAS, 2006). A região é
⁴⁰ caracterizada pela transição entre o Cerrado (savana
⁴¹

⁴² brasileira) e a Mata Atlântica (BRASIL, 1962), com apenas
⁴³ pequenos fragmentos de vegetação natural remanescentes.
⁴⁴ A agropecuária contribui com cerca de 15% do produto
⁴⁵ interno bruto (PIB) do Município (IBGE, 2012).

⁴⁶ O arcabouço geológico é da área é formado por
⁴⁷ gnaisses charnoquíticos e granulíticos polimetamórficos, de
⁴⁸ idades pré-cambrianas (HASUI, 2010). Possui domínios
⁴⁹ hidrogeológicos complexos, com cinco unidades
⁵⁰ geológicas de características distintas: Grupos Andrelândia
⁵¹ e Carrancas e os Complexos Campos Gerais, Varginha-
⁵² Guaxupé e Lavras (CPRM; UFRJ, 2010).

⁵³ O Grupo Andrelândia (NPax e NPag), conforme
⁵⁴ Fupai (2013), é caracterizado como uma unidade de rochas
⁵⁵ metassedimentares diversificadas, tendo na base quartzitos,
⁵⁶ seguidos por granada xistos feldspáticos, leptinitos e
⁵⁷ mármores. No Município de Alfenas, afloram dois tipos de
⁵⁸ litofácies do Grupo Andrelândia (PERTERNEL; TROW;
⁵⁹ SCHMITT, 2005). O primeiro corresponde a associação de
⁶⁰ litofácies basais, posicionada discordantemente, por falhas
⁶¹ de empurrão, sobre ortognaisses do embasamento e
⁶² constituída por biotita gnaisses de granulometria fina e
⁶³ laminação delgada. O segundo está assentado
⁶⁴ concordantemente sobre os biotita gnaisses, sendo
⁶⁵ composto por sucessões quartizíticas e intercalações
⁶⁶ subordinadas de quartzo-muscovita xistos.

⁶⁷ O Grupo Carrancas (NPcgx), segundo a Fupai
⁶⁸ (2013), é uma sequência alóctone dominada por rochas
⁶⁹ metapsamíticas que gradam, para o topo, para mica-grafita
⁷⁰ xisto. Este grupo é admitido como oriundo da margem
⁷¹ passiva Neoproterozoica da borda meridional da Placa
⁷² Sanfranciscana (RIBEIRO et al., 1995).

⁷³ As unidades do Complexo Varginha-Guaxupé
⁷⁴ que afloram no município são a Granulítica Basal (NPvg),
⁷⁵ a Ortognaissica Migmatítica Intermediária (NPvog) e a
⁷⁶ Paragnaissica Migmatítica Superior (NPvm). A primeira
⁷⁷ constituída por enderbito, granulito e granulito máfico de
⁷⁸ composição básica, enquanto que a segunda é constituída
⁷⁹ por anateixito, gnaiss granítico, migmatitos estromáticos e
⁸⁰ gnaiss tonalítico. A terceira unidade, por sua vez, é
⁸¹ constituída por paragnaisses, mica xistos e biotita gnaisses.
⁸² (FUPAI, 2013).

⁸³ Os terrenos arqueanos dos Complexos Lavras
⁸⁴ (A3la) e Campos Gerais (A3cg), segundo Fupai (2013),
⁸⁵ pertencem ao Domínio Gnáissico-Migmatítico Arqueano
⁸⁶ da região Sudeste do Brasil, representado por corpos de
⁸⁷ grande expressão espacial e intensamente deformados por
⁸⁸ eventos tectônicos posteriores. São constituídos por
⁸⁹ litologias muito antigas, tais como ortognaisses tonalíticos,
⁹⁰ graníticos, migmatíticos e anfíbolitos.

⁹¹ As sete classes de solos do local são
⁹² caracterizadas por apresentar as seguintes formações
⁹³ classificadas por UFV et al. (2010) atualizada com base em
⁹⁴ Brasil (1962): LVd2 – LATOSSOLO VERMELHO
⁹⁵ distrófico típico A moderado textura argilosa, LVd3 –
⁹⁶ LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A
⁹⁷ fraco/moderado textura argilosa + LATOSSOLO
⁹⁸ VERMELHO-AMARELO distrófico típico A
⁹⁹

¹ fraco/moderado textura argilosa, LVAd1 – LATOSSOLO
² VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado
³ textura argilosa, LAd1 – LATOSSOLO AMARELO
⁴ distrófico húmico textura argilosa + LATOSSOLO
⁵ AMARELO distrófico típico A proeminente textura
⁶ argilosa, PVd1 – ARGISSOLO VERMELHO distrófico
⁷ típico A moderado/fraco textura média/argilosa, PVae2 -
⁸ ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico
⁹ A moderado textura média/argilosa e GMd4 -
¹⁰ GLEISSOLO MELÂNICO distrófico típico A
¹¹ proeminente textura argilosa +
¹² NEOSSOLO QUARTZARÊNICO hidromórfico A
¹³ moderado + ORGANOSSOLOS HÁPLICO sáprico
¹⁴ típicos e terriços; todos fase campestre, relevo plano.

¹⁵ MATERIAIS E MÉTODOS

¹⁶ As informações geográficas georreferenciadas
¹⁷ utilizadas no trabalho foram criadas, desenvolvidas e
¹⁸ analisadas no *software* ArcGIS® 10.3.1 (ESRI, 2014). Para
¹⁹ construir o banco de dados foram utilizadas as cartas
²⁰ topográficas (IBGE, 1971) dos Municípios de Alfenas (SF-
²¹ 23-I-I-3), Areado (SF-23-V-D-I-4), Campestre (SF-23-V-
²² D-IV-2), Campos Gerais (SF-23-V-D-I-4), Conceição da
²³ Aparecida (SF-23-V-D-I-2) e Machado (SF-23-I-III-1),
²⁴ todas na escala 1:50.000. As Cartas Geológicas do
²⁵ Programa de Geologia do Brasil da CPRM e UFRJ (2010)
²⁶ dos Municípios de Alpinópolis (SF-23-V-B-IV), Machado
²⁷ (SF-23-V-D-V), Alfenas (SF-23-V-D-II), Guapé (SF-23-V-
²⁸ B-V), Campo Belo (SF-23-V-B-VI), Nepomuceno (SF-23-
²⁹ V-D-III) e Varginha (SF-23-V-D-VI), ambas na escala de
³⁰ 1:100.000.

³¹ Foram utilizados também os metadados do Mapa
³² de Geodiversidade do Estado de Minas Gerais (CPRM,
³³ 2006), na escala 1:750.000, o Mapa de Domínios e
³⁴ Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil (CPRM, 2007) na
³⁵ escala 1:1.000.000, o Mapa de Solos do Estado de Minas
³⁶ Gerais, na escala: 1:650.000 (UFV et al., 2010), as imagens
³⁷ SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (MIRANDA,
³⁸ 2005) da Embrapa Brasil em Relevo que forneceram, junto
³⁹ com as cartas topográficas do IBGE de 1971, informações
⁴⁰ altimétricas da superfície terrestre em um nível de detalhe
⁴¹ mais generalizado, compatíveis à escala do trabalho. As
⁴² classes de declividade foram reclassificadas de acordo com
⁴³ Embrapa (2013).

⁴⁴ Vale ressaltar que estes materiais foram utilizados
⁴⁵ para validar as feições geológicas encontradas nas Cartas
⁴⁶ Geológicas do CPRM – GEOBANK, em maior detalhe.
⁴⁷ Assim como o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais
⁴⁸ (UFV et al., 2010), o Mapa de Domínios e Subdomínios
⁴⁹ Hidrogeológicos do Brasil (CPRM, 2007) e o Mapa de
⁵⁰ Geodiversidade do Estado de Minas Gerais (CPRM, 2006)
⁵¹ são materiais cartográficos generalistas, mas que se
⁵² coadunam aos objetivos desta pesquisa, pois permitiram
⁵³ considerar as variáveis físicas da área de estudo na escala
⁵⁴ proposta. Estudos de maior escala e maiores detalhes,
⁵⁵ necessitam de dados mais precisos e informações
⁵⁶ georreferenciadas de fontes seguras.

⁵⁷ Para mapear o uso e ocupação da terra para o ano
⁵⁸ de 2015, foi obtida uma imagem de satélite gerada pelo
⁵⁹ sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do Landsat-8, com
⁶⁰ data de 04 de maio de 2015, nas bandas TM2 (faixa verde),
⁶¹ TM4 (infravermelho próximo) e TM5 (infravermelho
⁶² médio). A imagem é fornecida gratuitamente pela United
⁶³ States Geological Survey (USGS, 2015) dos Estados
⁶⁴ Unidos da América. A imagem foi obtida em época de
⁶⁵ seca, permitindo um detalhamento entre as áreas culturas
⁶⁶ permanentes (café), culturas temporárias (cana-de-açúcar,
⁶⁷ milho, feijão, soja) pastagens e solos exposto, por exemplo.

⁶⁸ Para alcançar o objetivo proposto, foi utilizada a
⁶⁹ análise multicritério com base na metodologia proposta
⁷⁰ por Costa et al. (2015). Tal metodologia é baseada em
⁷¹ matrizes de decisão, tabulação cruzada e na avaliação
⁷² multidisciplinar dos critérios selecionados. Para este
⁷³ trabalho utilizou-se, então, o Mapa Síntese dos Domínios
⁷⁴ Hidrogeológicos, o Mapa Síntese das Classes de Solos, o
⁷⁵ Mapa Síntese das Classes de Declividade, o Mapa Síntese
⁷⁶ Falhas Geológicas e a Carta de Uso e Ocupação do Solo
⁷⁷ no Município de Alfenas – MG.

⁷⁸ A análise multicritério, segundo Costa et al.
⁷⁹ (2015), é caracterizada pelo cruzamento de atributos do
⁸⁰ meio físico e antrópicos em Sistema de Informações
⁸¹ Geográficas (SIG). Este modelo metodológico de
⁸² investigação tem sido efetivo quando aplicado à gestão e
⁸³ ao planejamento do espaço num determinado contexto,
⁸⁴ como por exemplo, determinar áreas com potencial de
⁸⁵ contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.

⁸⁶ De acordo Valle Junior et al. (2015), a análise
⁸⁷ multicritério exige, para a sua aplicação, a definição e a
⁸⁸ padronização dos fatores ambientais que são relevantes
⁸⁹ para o problema.

⁹⁰ Metodologias multicritérios têm sido empregadas
⁹¹ em diversos estudos relacionados ao planejamento
⁹² ambiental, devendo ser utilizada em situações nas quais a
⁹³ análise de apenas uma variável não representa a realidade
⁹⁴ do fenômeno estudado (SANTOS, 2010). O procedimento
⁹⁵ análise multicritério é baseado no mapeamento de variáveis
⁹⁶ por planos de informações e na definição do grau de
⁹⁷ pertinência de cada plano e de cada um de seus
⁹⁸ componentes de legenda para a construção do resultado
⁹⁹ final, utilizando-se fatores de ponderação, sempre que
¹⁰⁰ necessário (MOURA, 2014).

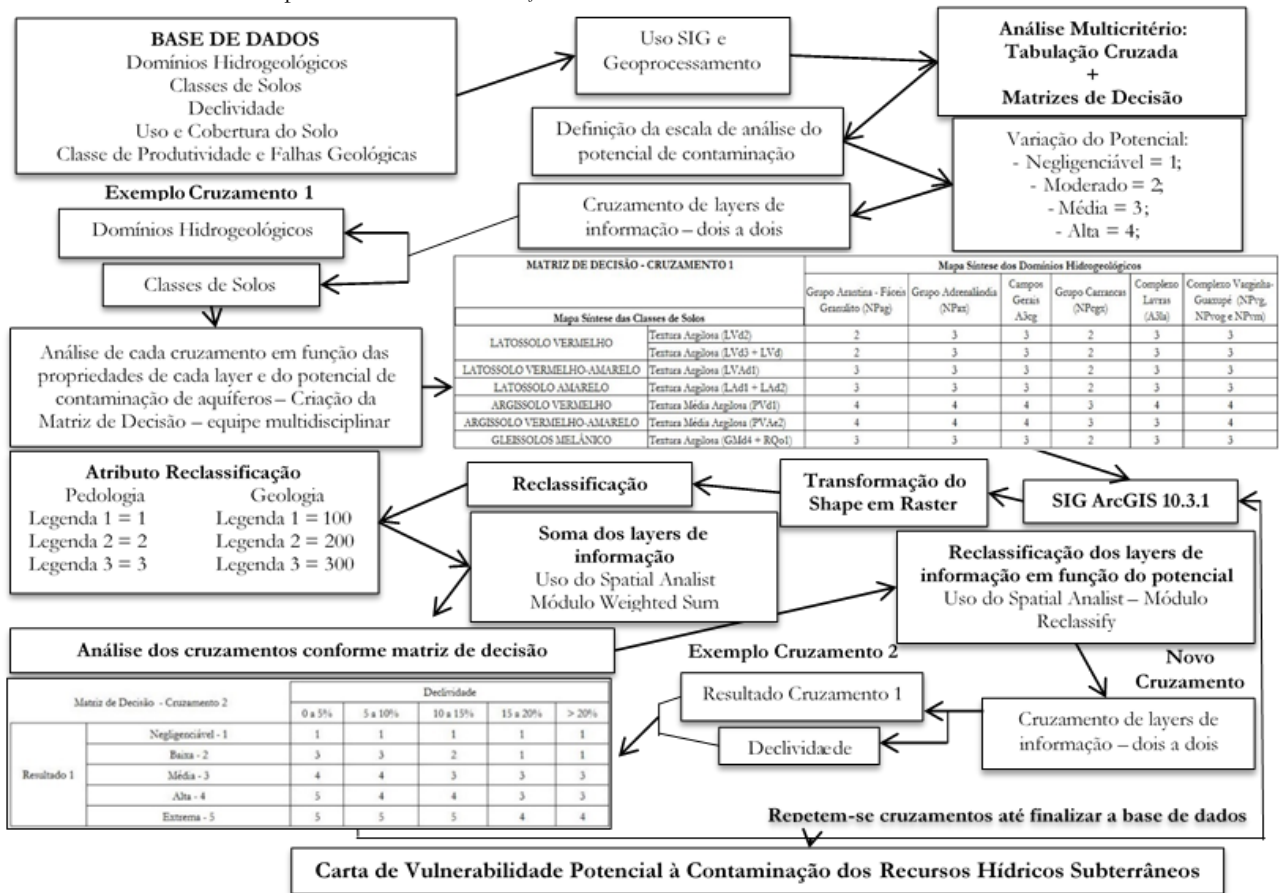
¹⁰¹ Diante do exposto, chegou-se a análise das
¹⁰² variáveis ambientais e dos cenários descritos pela realidade
¹⁰³ da área de estudo, norteado por uma visão multidisciplinar.
¹⁰⁴ O processo metodológico (Figura 2) descreve através do
¹⁰⁵ fluxograma as etapas da metodologia multicritério utilizada
¹⁰⁶ tendo como exemplo os dois primeiros cruzamentos
¹⁰⁷ juntamente com as matrizes de decisão criadas no processo
¹⁰⁸ (Mapa Síntese das

¹⁰⁹ Classes de Domínios Hidrogeológicos *versus* Mapa
¹¹⁰ Síntese das Classes de Solos e o resultado deste
¹¹¹ cruzamento – Cruzamento 1 *versus* Declividade) realizados.

1 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

2 De acordo com a proposta metodológica deste
 3 trabalho, foram analisados quatro cruzamentos com a
 4 escala de vulnerabilidade potencial à contaminação dos

5 recursos hídricos subterrâneos definidas em: Extrema,
 6 Alta, Moderada, Baixa e Negligenciável (FOSTER;
 7 HIRATA; ANDREO, 2013).



9 **Figura 2 – Fluxograma metodológico da pesquisa modificado de Costa et al. (2015)**

10 Para compreender a vulnerabilidade potencial à
 11 contaminação dos recursos hídricos subterrâneos é
 12 necessário correlacionar as variáveis do meio físico
 13 (Figuras 3A, 3B e 3C e 3D) com as classes de uso e
 14 cobertura dos solos (Figura 3E). A correlação é feita da
 15 seguinte forma:

16 1) a classe de área urbana está situada sobre os
 17 Domínios Hidrogeológicos Complexo Varginha-Guaxupé
 18 (Unidade granulítica basal) ao sul e o Grupo Adrelândia
 19 (Unidade de cianita-granada granulitos) ao norte. A área
 20 urbana, ao longo da sua história, cresceu no sentido Norte-
 21 Noroeste avançando sobre o Domínio Hidrogeológico do
 22 Grupo Adrelândia. Com cerca de 1.462 hectares a área
 23 urbana para o ano de 2015 representa 1,73% do total.
 24 Quanto a classe de solos está localizada sobre o
 25 LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A
 26 moderado com textura argilosa (LVd2) e em alguns locais
 27 (GMd4) predominantemente em declividades planas e
 28 suaves (0 a 3% e 3 a 8%).

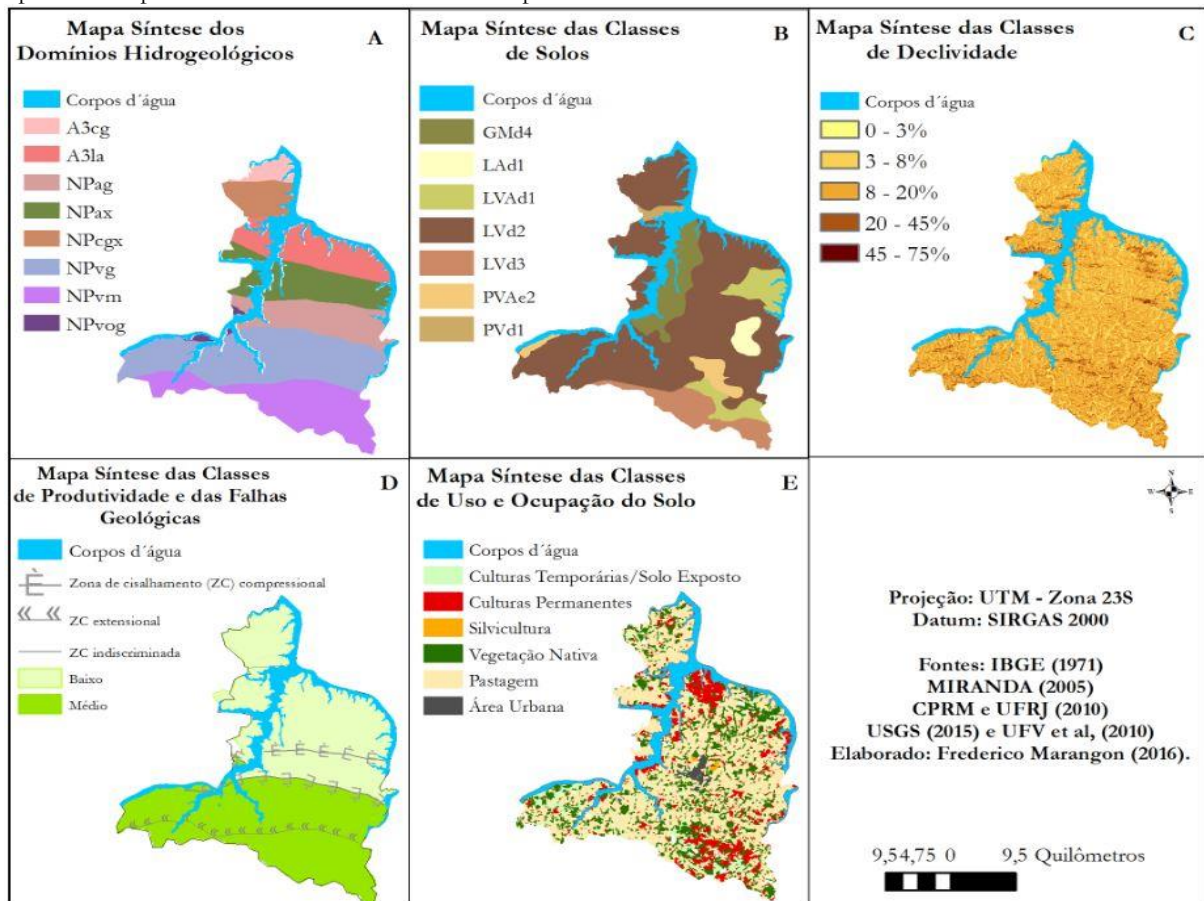
29 Ao analisar o primeiro cruzamento (Mapa Síntese
 30 dos Domínios Hidrogeológicos *versus* Classes de Solos), foi
 31 verificado que a vulnerabilidade potencial à contaminação
 32 dos recursos hídricos subterrâneos, na classe área urbana,
 33 ficou baixa ao norte e moderada ao sul, resultado da
 34 resistência litológica ao processo de percolação das águas
 35 subterrâneas e da predominância de solos de texturas
 36 argilosas.

37 Ao analisar o primeiro cruzamento (Mapa Síntese
 38 dos Domínios Hidrogeológicos *versus* Classes de Solos), foi
 39 verificado que a vulnerabilidade potencial à contaminação
 40 dos recursos hídricos subterrâneos, na classe área urbana,
 41 ficou baixa ao norte e moderada ao sul, resultado da
 42 resistência litológica ao processo de percolação das águas
 43 subterrâneas e da predominância de solos de texturas
 44 argilosas. Já, nos cruzamentos três e quatro, a localização
 45 da mancha urbana sobre a classe de produtividade
 46 hidrogeológica baixa e sobre falha geológica, a
 47 vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos
 48 hídricos subterrâneos alcançou a escala alta e moderada.

¹ (Esta classe representa 4,00% da vulnerabilidade potencial
² alto ilustrado no mapeamento.

³ 2) a classe de culturas permanentes está
⁴ distribuída geograficamente de forma homogênea sobre
⁵ 13,36% da área do município. Esta classe recobre todos os
⁶ domínios hidrogeológicos, com presença significativa no
⁷ Complexo Campos Gerais ao Norte e no Complexo

⁸ Varginha-Guaxupé ao Sul. Ocorre sobre todas as classes
⁹ de solos nas declividades onduladas e inclinadas,
¹⁰ respectivamente, 3 a 8% e 8 a 20%. Pelo primeiro
¹¹ cruzamento, foi averiguado que a classe está na
¹² vulnerabilidade potencial moderada (1,67%) e baixa
¹³ (0,57%), devido às características litológicas



¹⁴ **Figura 3 – Planos de informações das variáveis do meio físico e do uso e ocupação por atividades humanas**
¹⁵ das rochas ígneas e metamórficas e dos solos argilosos
¹⁶ presentes nesta cultura.
¹⁷

¹⁸ Ao analisar o resultado do cruzamento dois, foi
¹⁹ diagnosticada uma elevação da vulnerabilidade potencial à
²⁰ contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, pois esta
²¹ cultura está geograficamente em declividades onduladas e
²² suaves, o que permite uma maior infiltração de água, com
²³ os possíveis contaminantes.

²⁴ Nos cruzamentos três e quatro, a prática agrícola
²⁵ de culturas permanentes consome relativamente menos
²⁶ recursos naturais, entretanto, como são produzidos por
²⁷ técnicas convencionais, introduzem no meio ambiente
²⁸ compostos e elementos químicos que podem desencadear
²⁹ desequilíbrios ecológicos significativos. Diante disso, a
³⁰ vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos
³¹ hídricos subterrâneos atingiu a escala de vulnerabilidade
³² extrema e alta. Ao final do processo metodológico, foi
³³ registrado que as culturas permanentes representam

³⁴ 58,93% da vulnerabilidade extrema e 64,23% da alta
³⁵ (Figura 4 e Tabela 1).

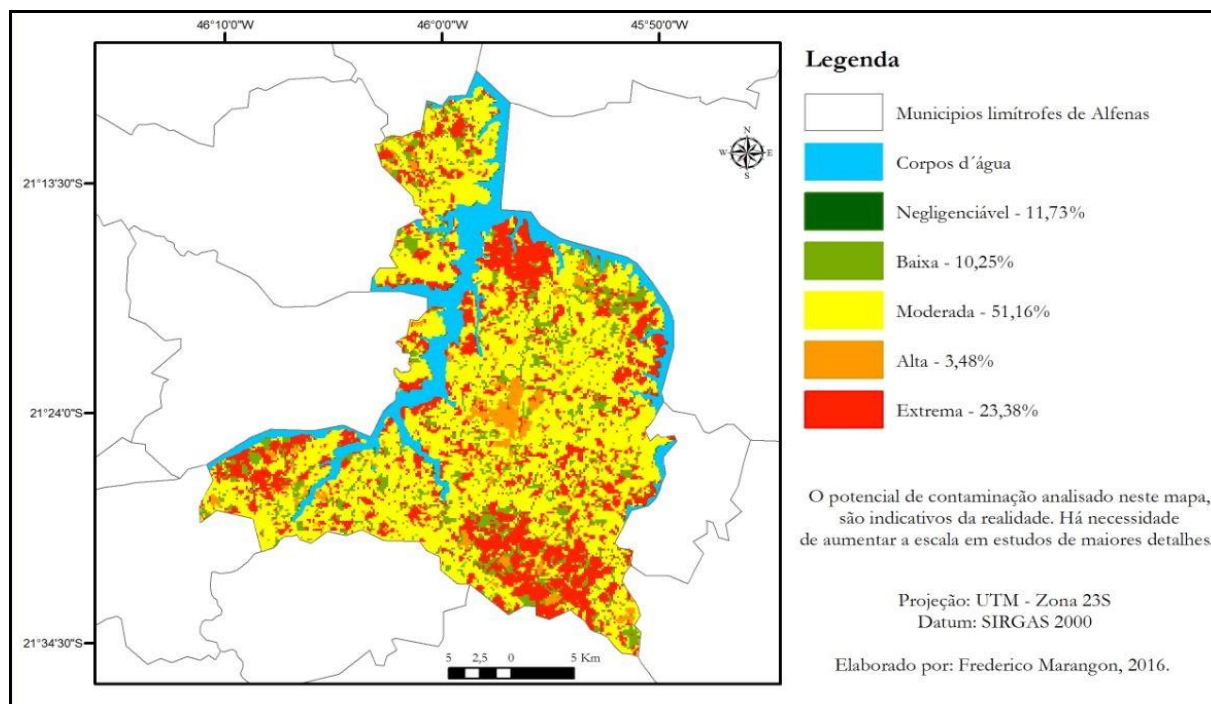
³⁶ 3) as classes de solo exposto e culturas
³⁷ temporárias iniciais representam 6,21% da área de estudo.
³⁸ Estas classes recobrem todos os domínios hidrogeológicos
³⁹ e todas as classes de solos nas declividades planas, suaves e
⁴⁰ onduladas. Sobre vulnerabilidade potencial à contaminação
⁴¹ dos recursos hídricos subterrâneos, foi notada a
⁴² predominância dessas classes em solos com características
⁴³ argilas derivadas do intemperismo das rochas ígneas
⁴⁴ presentes. Estas características resultaram em
⁴⁵ vulnerabilidade potencial moderada e baixa no primeiro
⁴⁶ cruzamento.

⁴⁷ O segundo cruzamento mostrou que o potencial
⁴⁸ alcançou as escalas moderada e alta, devido estas culturas
⁴⁹ serem produzidas da mesma forma que as culturas
⁵⁰ permanentes, com técnicas agrícolas convencionais à base
⁵¹ de agrotóxicos e herbicidas. Já, no cruzamento quatro, as
⁵² áreas de culturas temporárias e de solo exposto estão

¹ próximas de falhas geológicas, com baixa produtividade
² hidrogeológica alcançaram as escalas de vulnerabilidade
³ potencial moderada e alta. As áreas de solo preparado para
⁴ as culturas temporárias e solo exposto representam 25,25%
⁵ da vulnerabilidade potencial alta e 9,70% da extrema.

⁶ Vale ressaltar que a classificação da imagem de
⁷ satélite não distinguiu a diferença espectral entre as
⁸ culturas temporárias iniciais e o solo exposto. O

⁹ comportamento espectral das duas classes é similar, o que
¹⁰ induziu a presença de solo exposto em parcelas de culturas
¹¹ temporárias iniciais e vice-versa. Foi considerado que o
¹² solo exposto é a preparação dos solos para o início do
¹³ plantio de uma determinada cultura temporária. É
¹⁴ justamente neste processo que os compostos e elementos
¹⁵ químicos são introduzidos e afetam direta e indiretamente
¹⁶ o equilíbrio ecossistêmico destas áreas.



¹⁸
¹⁹ **Figura 4 – Carta de Vulnerabilidade Potencial à Contaminação dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Município de Alfenas –**
²⁰ **MG**

²¹
²²
²³ **Tabela 1 – Porcentagem distribuída dos Usos e Coberturas dos Solos versus Vulnerabilidade Potencial à Contaminação**

	Extrema	%	Alta	%	Moderada	%	Baixa	%	Negligenciável	%
Vegetação Nativa	-	-	-	-	-	-	8,56	96,65	-	-
Área Urbana	0,21	0,89	0,33	4,00	0,37	0,21	0,42	1,29	-	-
Culturas Temporárias Iniciais/Solo Exposto	2,27	9,70	1,00	25,25	3,78	4,43	0,09	0,37	-	-
Culturas Temporárias	7,02	30,02	0,80	4,13	2,72	3,76	-	-	-	-
Culturas Permanentes	13,78	58,93	1,30	64,24	1,24	1,63	0,22	0,57	-	-
Corpos d'água	-	-	-	-	-	-	-	-	4,00	32,68

Represa de Furnas	-	-	-	-	-	-	-	-	7,73	67,32
Silvicultura	0,13	0,76	0,05	0,38	1,02	0,94	-	-	-	-
Pastagem	-	-	-	-	42,03	89,03	0,96	1,12	-	-
Total	23,38% 194,47 km ²	100%	3,48% 29,60 km ²	100%	51,16% 87,14km ²	100%	10,25% 87,14 km ²	100%	11,73% 103,87 km ²	100%

4) a classe de culturas temporárias consolidadas representa 12,03% da área de estudo e está distribuída homogeneamente em todas as variáveis do meio físico analisadas.

No primeiro cruzamento foi verificado que esta classe apresenta a vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos moderada (3,76% do total diagnosticado). No segundo cruzamento, foi observada a predominância desta cultura em declividades planas e suaves, que facilita que possíveis contaminantes utilizados na produção destas culturas infiltrem nos solos, subsolos e, conseqüentemente, no lençol freático. Foi constatado que esta cultura está sobre falhas geológicas com média produtividade hidrogeológica em sua maioria. Como resultado destas características, a classe de culturas temporárias consolidadas, que inserem grandes quantidades de agrotóxicos e compostos químicos impactantes para os sistemas ambientais, alcançou a vulnerabilidade potencial extrema (30,02%) e alta (4,13%).

5) a classe de pastagem está distribuída geograficamente em 46,32% do município e presente em todos os domínios hidrogeológicos, em todas as classes de solos, sobretudo, nos LATOSSOLOS VERMELHO distrófico (LVd2) e LATOSSOLOS VERMELHO distrófico (LVd3) + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico, em todas as classes de declividade, sobre produtividade hidrogeológica baixa e média e sobre falhas geológicas.

Os tipos de solos de texturas argilosas quando cruzados com as litologias dos Complexo Lavras, Campos Gerais e Varginha-Guaxupé e com os Grupos Carrancas e Andrelândia resultaram na escala de vulnerabilidade potencial negligenciável e baixa. Nos cruzamentos posteriores foi considerado que a pastagem está associada a retirada da cobertura vegetal nativa, que provoca mudanças nas características dos solos, devido a isto a vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos desta classe atingiu a escala moderada (89,03%).

6) foram mapeadas na área de estudo a classe de silvicultura (0,77% da área total). Esta cultura está inserida em dois domínios hidrogeológicos: o Grupo Andrelândia - unidade de cianita-granada granulitos, caracterizada por rochas mais resistentes e impermeáveis e, sobre o Complexo Varginha-Guaxupé - unidade paragnáissica migmatítica superior, caracterizada pela boa

permeabilidade e por porosidade secundária. No que tange às classes de solos, a silvicultura é desenvolvida sobre o LATOSSOLO VERMELHO distrófico e o LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico em declividades suaves e onduladas distante de falhas geológicas e com média produtividade hidrogeológica.

No cruzamento um, foi verificado que esta cultura apresenta vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos negligenciável e baixa, devido a predominância de rochas mais resistentes e impermeáveis e de solos argilosos. No cruzamento dois, foi observado que atingiu a escala de vulnerabilidade potencial moderada, por estar inserida em declividades suaves e onduladas, que facilitam a infiltração e percolação de componentes impactantes.

Já nos cruzamentos três e quatro a vulnerabilidade potencial desta classe foi mantida na escala moderada (0,94%), sendo insignificante a presença desta cultura nas escalas alta (0,38%) e extrema (0,76%).

7) a vegetação nativa presente na área (7,36%) está distribuída em pequenos fragmentos. Esta classe ocorre em todos os domínios hidrogeológicos, classes de solos, graus de declividades e classes de produtividade hidrogeológica baixa e média e desassociada das falhas geológicas.

Em suma, os cruzamentos do processo metodológico desta classe evidenciaram que 96,65% da vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos é baixa.

8) apesar dos corpos d'água da área estarem estritamente relacionados às falhas geológicas, que podem influenciar no escoamento e na infiltração de contaminantes oriundos das atividades antrópicas, as áreas do Reservatório de Furnas e demais corpos d'água (12,22% do total) foram desconsideradas do processo metodológico por apresentarem vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos negligenciável, 67,32% e 32,68%, respectivamente.

CONCLUSÃO

A análise multicritério apoiada em SIG, utilizada nesta pesquisa como instrumento de integração das variáveis selecionadas, se mostrou eficaz e adequada para o planejamento e gestão ambiental.

O Município de Alfenas apresenta vulnerabilidade potencial à contaminação dos recursos hídricos

¹ subterrâneos significativa na escala extrema (23,38%),
² resultado da combinação entre: 1) culturas permanentes e
³ culturas temporárias, 2) solos com texturas média argilosa
⁴ e 3) arcabouço litológico de boa capacidade de
⁵ armazenamento e transmissão de água. Tais fatores,
⁶ combinados às declividades suaves e onduladas de
⁷ produtividade hidrogeológica média e próximo de falhas
⁸ geológicas, contribuiu para que as classes de culturas
⁹ permanentes e temporárias aumentassem a vulnerabilidade
¹⁰ potencial.

¹¹ As áreas de vulnerabilidade potencial à
¹² contaminação aos recursos hídricos subterrâneos
¹³ moderada (51,16% do total) estão associadas às rochas do
¹⁴ embasamento cristalino, que em sua maioria apresentam
¹⁵ características que desfavorecem a infiltração e percolação
¹⁶ da água.

¹⁷ Áreas de vulnerabilidade potencial baixa (10,25%)
¹⁸ e negligenciável (11,73%) estão conexos aos solos de
¹⁹ textura argilosa associados às declividades onduladas,
²⁰ distante de falhas geológicas, com produtividade
²¹ hidrogeológica baixa e usos e cobertura do solo que
²² apresentam baixo potencial à contaminação aos recursos
²³ hídricos subterrâneos, como por exemplo, a pastagem ou
²⁴ silvicultura.

²⁵ A avaliação da vulnerabilidade potencial à
²⁶ contaminação dos recursos hídricos subterrâneos de
²⁷ Alfenas – MG, pela análise multicritério das variáveis do
²⁸ meio físico e do uso antrópico foram eficazes para a
²⁹ geração de conhecimento primário e secundário sobre o
³⁰ tema de pesquisa. Assim, o mapeamento da
³¹ vulnerabilidade potencial da área permite o direcionamento
³² de ações de adequação, mitigação e regularização de
³³ passivos ambientais em áreas que apresentaram
³⁴ vulnerabilidade potencial extrema e alta.

³⁶ AGRADECIMENTOS

³⁷
³⁸ À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de
³⁹ Minas Gerais – FAPEMIG – pela concessão da bolsa de
⁴⁰ estudo.
⁴¹

⁴² REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ⁴³ AB'SABER, A. N. *Formas de relevo: texto básico*. São Paulo:
⁴⁴ Edart, 1975. 80 p.
⁴⁵
⁴⁶ ALFENAS. Prefeitura municipal de Alfenas. *Plano Diretor*
⁴⁷ *de Alfenas* (Leitura técnica, em processo de revisão),
⁴⁸ Alfenas, Minas Gerais, 2006. 189p.
⁴⁹
⁵⁰ BRASIL. Ministério da Agricultura. *Levantamento de*
⁵¹ *reconhecimento dos solos da região sob influência do reservatório de*
⁵² *Furnas*. Boletim Técnico n. 13 do Serviço Nacional De
⁵³ Conservação dos Solos. Rio de Janeiro: Brasil, 1962. 462 p.

- ⁵⁴
⁵⁵ CARVALHO, L. G.; OLIVEIRA, M. C.; ALVES, M. C.;
⁵⁶ VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; CASTRO
⁵⁷ NETO, P.; DANTAS, A. A. A. Clima. In: SCOLFORO, J.
⁵⁸ R. S.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D.
⁵⁹ *Zoneamento Ecológico-Econômico de Minas Gerais – componentes*
⁶⁰ *geofísico e biótico*. Lavras: Editora UFLA, 2008. 161p.

- ⁶¹
⁶² CEREDA JUNIOR, A.; RÖHM, S. A. Analysis of
⁶³ Environmental Fragility Using Multi-Criteria Analysis
⁶⁴ (MCE) for Integrated Landscape Assessment. *Journal of*
⁶⁵ *Urban and Environmental Engineering*, v. 8, n. 1, p. 28-37,
⁶⁶ abril, 2014.

- ⁶⁷
⁶⁸ COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS
⁶⁹ MINEIRAIOS (CPRM); UNIVERSIDADE ESTADUAL
⁷⁰ DO RIO DE JANEIRO (UERJ). *Cartas Geológicas do*
⁷¹ *Programa de Geologia do Brasil*. Folhas Geológicas de
⁷² Alpinópolis (SF-23-V-B-IV), Machado (SF-23-V-D-V),
⁷³ Alfenas (SF-23-V-D-II), Guapé (SF-23-V-B-V), Campo
⁷⁴ Belo (SF-23-V-B-VI), Nepomuceno (SF-23-V-D-III) e
⁷⁵ Varginha (SF-23-V-D-VI). Escala: 1:100.000. Brasília:
⁷⁶ CPRM. 2010.

- ⁷⁷
⁷⁸ COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS
⁷⁹ MINEIRAIOS (CPRM). *Mapa de domínios e subdomínios*
⁸⁰ *hidrogeológicos do Brasil*. Escala: 1: 2.500.000. Projeto SIG de
⁸¹ Disponibilidade Hídrica do Brasil (SDHB). Brasília:
⁸² CPRM, 2007.

- ⁸³
⁸⁴ COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS
⁸⁵ MINEIRAIOS (CPRM). *Mapa de Geodiversidade do Estado de*
⁸⁶ *Minas Gerais*. Escala: 1:750.000. Brasília: CPRM, 2006.

- ⁸⁷
⁸⁸ COSTA, W. C.; CANÇADO, C.; MORAES, M. P.;
⁸⁹ MARANGON, F.; GUERRERO, J. V. R.; LORANDI, R.;
⁹⁰ LOLLO, R.; MOSCHINI, L. E. Potencial de
⁹¹ Contaminação de Aquíferos da Bacia do Ribeirão do Meio
⁹² – Município de Leme – SP. *Revista Brasileira de Recursos*
⁹³ *Hídricos*. v. 20, n. 1, p. 218-225, jan/mar., 2015.

- ⁹⁴
⁹⁵ CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Avaliação da
⁹⁶ vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero
⁹⁷ Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação
⁹⁸ dos métodos GOD e POSH. *Geociências*, v. 29, n. 3, p. 401-
⁹⁹ 411, 2010.

- ¹⁰⁰
¹⁰¹ EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA
¹⁰² AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de
¹⁰³ Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3.
¹⁰⁴ ed. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 412 p.

- ¹⁰⁵
¹⁰⁶ ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH
¹⁰⁷ INSTITUTE (ESRI). ArcGIS for the desktop 10.3.1, 2014.

- ¹⁰⁸
¹⁰⁹ FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ACESSORAMENTO
¹¹⁰ À INDÚSTRIA (FUPAI) – *Plano Diretor de Recursos Hídricos*

- ¹ da Bacia Hidrográfica do Entorno do Lago de Furnas: Relatório 1
² – Diagnóstico da Bacia Hidrográfica. Itajubá, MG, 2013. 305 p.
³
- ⁴ FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO B. The aquifer
⁵ pollution vulnerability concept: aid or impediment in
⁶ promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, v.
⁷ 21, p. 1389-1392, 2013.
⁸
- ⁹ DUCCI, D.; SELLERINO, M. Vulnerability mapping of
¹⁰ groundwater contamination based on 3D
¹¹ lithostratigraphical models of porous aquifers. *Sci. Total*
¹² *Environmental*, v. 447, p. 315-322, 2013.
¹³
- ¹⁴ HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do Sudeste
¹⁵ Brasileiro e a estruturação regional. *Geociências*, v. 29, n. 2,
¹⁶ p. 141-169, 2010.
¹⁷
- ¹⁸ INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E
¹⁹ ESTATÍSTICA (IBGE). *Cartas Topográficas: Folhas*
²⁰ *Topográficas de Alfenas (SF-23-I-I-3), Areado (SF-23-V-D-I-4),*
²¹ *Campestre (SF-23-V-D-IV-2), Campos Gerais (SF-23-V-D-I-*
²² *4), Conceição da Aparecida (SF-23-V-D-I-2) e Machado (SF-23-*
²³ *I-III-1).* Escala 1:50.000, 1971.
²⁴
- ²⁵ INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E
²⁶ ESTATÍSTICA (IBGE). *Diretoria de Pesquisas - DPE -*
²⁷ *Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIIS.*
²⁸ Estimativas da População Residente nos Municípios
²⁹ Brasileiros com Data de Referência em 1º de julho de
³⁰ 2015.
³¹
- ³² INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E
³³ ESTATÍSTICA (IBGE). *Produção Agrícola Municipal*, Rio de
³⁴ Janeiro, v. 38, 2012. 97 p.
³⁵
- ³⁶ LÖBLER, C. A.; TERRA, L. G.; SILVA, J. L. S. Dados da
³⁷ CPRM/SIAGAS e imagens SRTM como base cartográfica
³⁸ na elaboração de mapeamento em recursos hídricos
³⁹ subterrâneos em escala municipal: o caso de Nova Palma,
⁴⁰ RS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 7, n. 3, p. 513-523,
⁴¹ 2014.
⁴²
- ⁴³ LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S.; MARTELLI, G. V.;
⁴⁴ ERTEL, T. Pontos Potenciais de Contaminação e
⁴⁵ Vulnerabilidade Natural das Águas Subterrâneas do
⁴⁶ Município de Restinga Seca – RS. *Revista Brasileira de*
⁴⁷ *Geografia Física*, v. 6, n. 3, p. 500-509, 2013.
⁴⁸
- ⁴⁹ MACHIWAL, D.; JHA, M. K. Identifying sources of
⁵⁰ groundwater contamination in a hard-rock aquifer system
⁵¹ using multivariate statistical analyses and GIS-based
⁵² geostatistical modeling techniques. *Regional Studies*. 2015.
⁵³ Disponível em:
⁵⁴ <[http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581814000470)
⁵⁵ [4581814000470](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581814000470)>. Acesso em: 12/02/2015.
⁵⁶
- ⁵⁷ MIRANDA, E. E. de; (Coord.). *Brasil em*
⁵⁸ *Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite,
⁵⁹ 2005. Disponível: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>
⁶⁰ Acesso em: 25 dez. 2015.
⁶¹
- ⁶² MOURA, A. C. M. *Geoprocessamento na Gestão e Planejamento*
⁶³ *Urbano*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 312 p.
⁶⁴
- ⁶⁵ PETERNEL, R.; TROUW, R. A. J.; SCHMITT, R. S.
⁶⁶ Interferência entre duas faixas móveis Neoproterozoicas:
⁶⁷ O caso das Faixas Brasília e Ribeira no Sudeste do Brasil.
⁶⁸ *Revista Brasileira de Geociências*, v. 3, n. 35, p. 297-310, 2005.
⁶⁹
- ⁷⁰ RIBEIRO, M. L.; LOURENCETTI, C.; PEREIRA, S. Y.;
⁷¹ MARCHI, M. R. R. Contaminação de águas subterrâneas
⁷² por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, v. 30, n.
⁷³ 3, p. 688-694, 2007.
⁷⁴
- ⁷⁵ RIBEIRO, A.; ANDREIS, R. R.; TROUW, R. A. J.;
⁷⁶ PACIULLO, F. V. P.; VALENÇA, J. G. Evolução das
⁷⁷ bacias proterozóicas e o termo-tectonismo brasileiro na
⁷⁸ margem sul do Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de*
⁷⁹ *Geociências*, v. 24, n. 4, p. 235-248, 1995.
⁸⁰
- ⁸¹ SANTOS, A. A. *Geoprocessamento aplicado à identificação de*
⁸² *áreas de fragilidade ambiental no parque estadual da Serra do Rola*
⁸³ *Moça*. Monografia (Especialização em Geoprocessamento).
⁸⁴ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 39 p.
⁸⁵ 2010.
⁸⁶ Disponível:[http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/p](http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/AMANDA.pdf)
⁸⁷ [ublicacoes/AMANDA.pdf](http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/AMANDA.pdf). Acesso em: 25 dez. 2015.
⁸⁸
- ⁸⁹ SANTOS, A. P.; ROCHA, S. F.; ABREU, M. V. S.;
⁹⁰ CALIJURI, M. L.; SANTOS, P. M. O uso da análise
⁹¹ multicritério no mapeamento da fragilidade social da área
⁹² urbanizada do município de Viçosa – MG. *Revista Brasileira*
⁹³ *de Cartografia*. v. 64, n. 5, p. 635-643, 2012.
⁹⁴
- ⁹⁵ SPAROVEK, G.; LIER, Q. J. V.; DOURADO NETO, D.
⁹⁶ Computer assisted Köppen climate classification: case
⁹⁷ study for Brazil. *Internacional Journal of Climatology*. v. 27, n.
⁹⁸ 2, p. 257-266, 2007.
⁹⁹
- ¹⁰⁰ UNITED STATES. United States Geological Survey
¹⁰¹ (USGS). LANDSAT_8. *Cena*: LC82190752015314LGN00.
¹⁰² Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso
¹⁰³ em: 23 de janeiro de 2014.
¹⁰⁴
- ¹⁰⁵ UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV);
¹⁰⁶ FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS
¹⁰⁷ GERAIS (CETEC); UNIVERSIDADE FEDERAL DE
¹⁰⁸ LAVRAS (UFLA) e FUNDAÇÃO ESTADUAL DE
¹⁰⁹ MEIO AMBIENTE (FEAM). *Mapa de solos do Estado de*
¹¹⁰ *Minas Gerais*. Belo Horizonte. Fundação Estadual do Meio
¹¹¹ Ambiente, 2010. 49 p. Disponível em:
¹¹² <[http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-](http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-deminas-gerais)
¹¹³ [estado-deminas-gerais](http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-deminas-gerais)>. Acesso em: 03 de junho de 2014.

1

2 VALLE JUNIOR, R. F., VARANDAS, S. G. P.,
3 FERNANDES, L. F. S., PACHECO, F. A. L. Multi
4 Criteria Analysis for the monitoring of aquifer
5 vulnerability: A scientific tool in environmental policy.
6 *Environmental Science & Policy*, v. 48, p. 250-264, 2015.
7 Disponível em:
8 <[http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146290111500012X)
9 [290111500012X](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146290111500012X)>. Acesso em 12/02/2015.

10

11

12 **Potential vulnerability to contamination of**
13 **groundwater resources by multi criteria analysis**

14

15 **ABSTRACT**

16

17 *The understanding of the processes of anthropogenic*
18 *activities on the expansion city planning is essential in the present*
19 *day. Yes, the misuse and badly planned natural resources impacts,*
20 *direct and indirect, in the quality and quantity of groundwater*
21 *resources. As for the problem of contamination of the resource, use*
22 *and analysis of soil coverage integrated with variables of the physical*
23 *environment can contribute to a better understanding of this issue.*
24 *This work was prepared the Charter of potential vulnerability to*
25 *contamination of groundwater resources of the municipality of*
26 *Alfenas, southern Minas Gerais State, which occupies 849.97 km².*
27 *The methodological structure was based on multi-criteria analysis*
28 *strategy decision matrix and cross-tabulation that rated the potential*
29 *vulnerability of contamination in the following classes: extreme, high,*
30 *moderate, low and negligible. The arrays are characterized by*
31 *intersections of physical environment and man-made attributes in*
32 *geographic information System (GIS) with the software ArcGIS ®*
33 *10.3.1. So, was that areas of potential vulnerability and extreme*
34 *51.16% respectively, and 23.38% of the study area and should be a*
35 *priority for mitigation actions of their potential vulnerabilities.*

36

37 **Keywords:** *integrated analysis, municipal planning, Geographic*
38 *Information System (GIS).*