

ESTUDO HIDROGEOLÓGICO AMBIENTAL EM REGIÃO CÁRSTICA NO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS – MINAS GERAIS: COMPORTAMENTO DE NITRATOS E DA ATRAZINA

Eduardo de Castro¹; Celso de Oliveira Loureiro² & João Herbert Moreira Viana³.

Resumo - O presente estudo, de natureza hidrogeológica ambiental, está sendo conduzido no campo experimental agrícola do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo–CNPMS, da Embrapa, em Sete Lagoas, Minas Gerais, através de um convênio firmado com o Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Minas Gerais, DESA/UFMG, e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais–COPASA. Trata-se da caracterização hidrogeoquímica do sistema aquífero local e do estabelecimento de um modelo de fluxo de águas subterrâneas, e de transporte de contaminantes, no entorno da área experimental do CNPMS, com foco nos possíveis cenários de contaminação dessas águas por nitratos e atrazina, cujas origens se devem à aplicação intensiva destes compostos em cultivos experimentais, principalmente de milho, soja e sorgo, conduzidos a pelo menos quatro décadas naquele local. A área está inserida nas microbacias dos ribeirões Matadouro e Jequitibá, afluentes perenes do rio das Velhas, onde predominam latossolos vermelhos distróficos, em uma região cárstica, no domínio geológico de calcários do Grupo Bambuí.

Abstract – An environmental hydrogeologic study is being currently conducted at the agricultural experimental field of the National Center for Research on Corn and Sorghum – CNPMS, of Embrapa, in Sete Lagoas, state of Minas Gerais, through a cooperation program signed with the Department of Sanitary and Environmental Engineering, of the Federal University of Minas Gerais, DESA/UFMG, and the Sanitation Company of Minas Gerais – COPASA. The study aims at characterizing the hydrogeochemistry of the local aquifer system and developing a groundwater flow and contaminant transport model for the region located around the experimental field of the CNPMS. An especial interest is focused on the possible scenarios of local groundwater contamination by nitrates and atrazine, whose origins are traceable to the intensive application of these compounds in agricultural experiments on corn, soybeans and sorghum cultures, conducted during the last four decades in that field. The study area is located at the karstic region of the Bambuí group geologic domain, within the hydrologic micro-basin of the Matadouro and Jequitibá rivers, perennial tributaries of the Velhas River. The local soil is predominately characterized by dystrophic reddish Latosols.

Palavras-Chave – Nitratos, Atrazina, Contaminação de Aquíferos

¹Hidrogeólogo, Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Professor do Colégio Técnico, Universidade Federal de Minas Gerais, Sala 223, Campus da UFMG, Pampulha, Belo Horizonte. Tel.: (31) 3409-4959. e-mail: eduardo@coltec.ufmg.br.

²Professor de Hidrogeologia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.110-060, Tel.: (31) 3409-1884, e-mail: celso@desa.ufmg.br.

³Pesquisador, Engenheiro Agrônomo, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo – CNPMS, EMBRAPA, Rodovia MG-424, Km 45, Cx.P. 285, CEP 35.701-970, Sete Lagoas, Minas Gerais, Tel.: (31) 3027-1248, e-mail: jherbert@cnpms.embrapa.br.

1. INTRODUÇÃO

O cerrado é um importante bioma, que alcança cerca de 24% do território do brasileiro; em Minas Gerais chega a cerca de 57% do território do estado. A partir dos anos 1970, seus solos têm sido ocupados e explorados através da agricultura intensiva, em particular para a exportação, com extensos cultivos de soja, milho e algodão.

Na porção mineira do cerrado encontra-se parte de uma das bacias hidrográficas mais importantes, no cenário hídrico brasileiro, ou seja, a bacia do rio São Francisco. Seus afluentes permanentes não são muitos, sendo que, quase todos, estão em Minas Gerais, principalmente na região do alto São Francisco. Entre esses, o rio das Velhas (Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – CBHSF, 2007). Este rio é alvo de um programa estadual de metas, que tem como uma de suas prioridades recuperá-lo, para uso de populações dos municípios ribeirinhos.

Na região do alto São Francisco, o clima varia de úmido a sub-úmido com chuvas de verão, distribuídas no período de outubro a março, tornando-se escassas e mesmo ausentes no inverno, de abril a setembro. As precipitações anuais estão entre 800 a 1.500mm, e a temperatura média anual é de cerca de 23°C (Tucci et.al., 2001).

As chuvas abundantes e distribuídas, a permeabilidade elevada dos solos do cerrado e a sua profundidade permitem a acumulação de águas das chuvas, que lentamente drenam para formação de veredas, que formam riachos e ribeirões, que se juntam em pequenos rios e, daí, formam os afluentes que despejam na calha principal do São Francisco.

As nascentes da maioria dos afluentes permanentes do São Francisco encontram-se nas regiões do cerrado, que ofertam mais de 85% da água do São Francisco. Os cerrados de Minas Gerais contribuem com 72% de sua vazão.

Duas sub-bacias integrantes da bacia do São Francisco, a saber, as bacias dos rios Paraopeba e Velhas, são expressivas como mananciais para abastecimento de água da região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

2. OBJETIVOS DO ESTUDO

O objetivo geral deste estudo é investigar e caracterizar o transporte de poluentes em ambiente hidrogeológico cárstico, na área experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo da EMBRAPA e no seu entorno, focalizando, em particular, o íon nitrato, originado de fertilizantes nitrogenados e o herbicida atrazina, aplicados em cultivos experimentais no CNPMS.

Os principais objetivos específicos, do estudo, em desenvolvimento são:

- elaborar uma metodologia adequada para avaliação hidrogeológica e ambiental da área do CNPMS e do seu entorno;
- estabelecer modelos hidrogeológicos conceituais sobre o aquífero local;
- elaborar um modelo hidrodinâmico computacional do aquífero local, utilizando, como ferramenta, o programa Visual MODFLOW® (Guiguer e Thomas, 1998);
- descrever o sistema de fluxo das águas subterrâneas e o balanço hídrico na bacia hidrográfica de influência direta sobre a área;
- estabelecer a metodologia experimental para quantificar o nitrato e os resíduos de atrazina, que possam estar presentes nos solos e nas águas locais;
- investigar e caracterizar a hidrogeoquímica das águas superficiais e subterrâneas, com auxílio do aplicativo computacional *PHREEQC2* (Parkhurst e Appelo, 1999);
- desenvolver um modelo hidrogeoquímico conceitual sobre o sistema hidrogeológico local;
- desenvolver um modelo hidrogeológico computacional, de transporte de poluentes, para a área experimental do CNPMS e do seu entorno, elaborado com o aplicativo computacional VisualMODFLOW®;
- definir e caracterizar o risco químico sobre o sistema aquífero local, pertinente ao uso sistemático de agroquímicos, na implantação e desenvolvimento das culturas de milho e sorgo; e,
- definir e caracterizar o risco químico sobre o ambiente, pertinente ao despejo de águas residuárias urbanas e industriais, nos corpos d'água de superfície, na área de influência do CNPMS.

3. ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Sete Lagoas, no limite noroeste da RMBH, a cerca de 80 km de Belo Horizonte é considerada o portal dos cerrados em Minas Gerais, na direção norte-noroeste. O município é um pólo de produção de ferro gusa. Nele e nos municípios vizinhos existem expressivas jazidas de calcário, que suprem importantes indústrias de cal e cimento (Nogueira, 2003).

Neste município está a sede do Centro Nacional de Pesquisa do Milho e Sorgo – CNPMS, da EMBRAPA, cuja área estende-se por mais de 2.000 ha, até o município de Prudente de Moraes, na área de influência de Sete Lagoas. Localiza-se no km 65 da rodovia estadual MG 424, a cerca de 12 km da sede municipal de Sete Lagoas (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 2005). Essa localização do CNPMS, segundo Nogueira (2003), deve-se ao fato de estar em uma área de transição, na região de Sete Lagoas, considerada a porta de entrada do cerrado brasileiro.

Trata-se de uma fazenda experimental, na qual são desenvolvidas pesquisas relacionadas, principalmente, ao cultivo de milho, sorgo e soja, no que tange à produtividade, uso do solo, irrigação, manejo de pragas e doenças, e desenvolvimento de tecnologias associadas (EMBRAPA, 2005).

A localização da área do CNPMS, totalmente inserida na bacia hidrográfica do rio das Velhas, está ilustrada na Figura 1, com um destaque para algumas cidades, na área de influência de Sete Lagoas. Em escala local, a rede hidrográfica é bastante pobre, não possuindo cursos d'água de grande volume, à exceção do próprio rio das Velhas, que constitui o limite oriental da região de interesse do estudo.

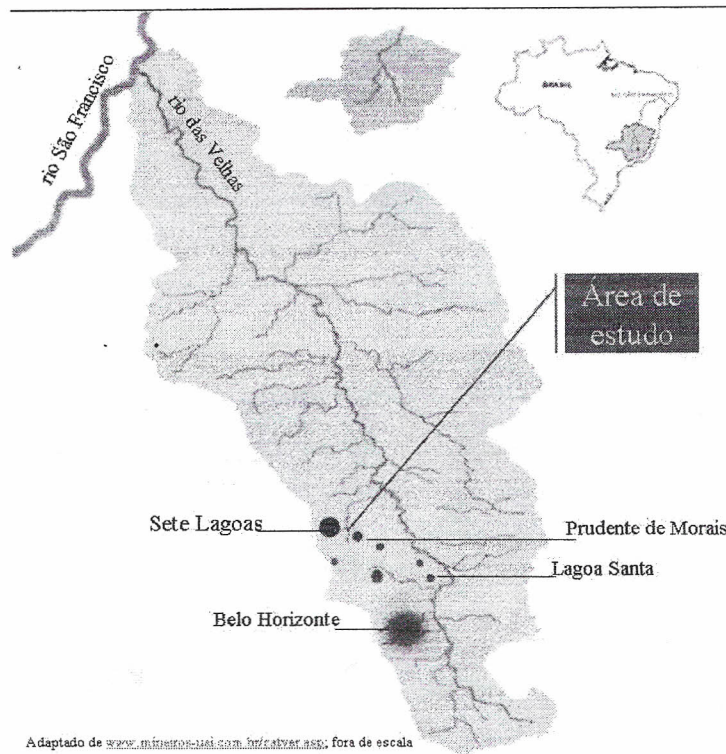


Figura 1: Localização da área de estudo na bacia do rio das Velhas.

A delimitação geográfica da região de interesse (que circunscribe a área do CNPMS) é apresentada na Figura 2, com imagem aérea obtida do *Google Earth*. A região de interesse é cortada por dois ribeirões perenes, da sub-bacia do rio Jequitibá, um dos afluentes do rio das Velhas. O ribeirão Matadouro que corta a área em sua porção norte, flui de NW para NE e o ribeirão Jequitibá, que flui de SE para NE, em boa parte dentro das terras da fazenda experimental do Gorutubam, um centro de pesquisa da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG, em Prudente de Morais.

O ribeirão Matadouro é um afluente do rio Jequitibá, que por sua vez deságua no rio das Velhas. Esse ribeirão, que recebe esgoto bruto de bairros de Sete Lagoas, outrora de águas limpas e utilizáveis por ribeirinhos e como manancial para irrigação, pelo CNPMS, já há algum tempo foi transformado em um esgoto cloacal, a céu aberto.

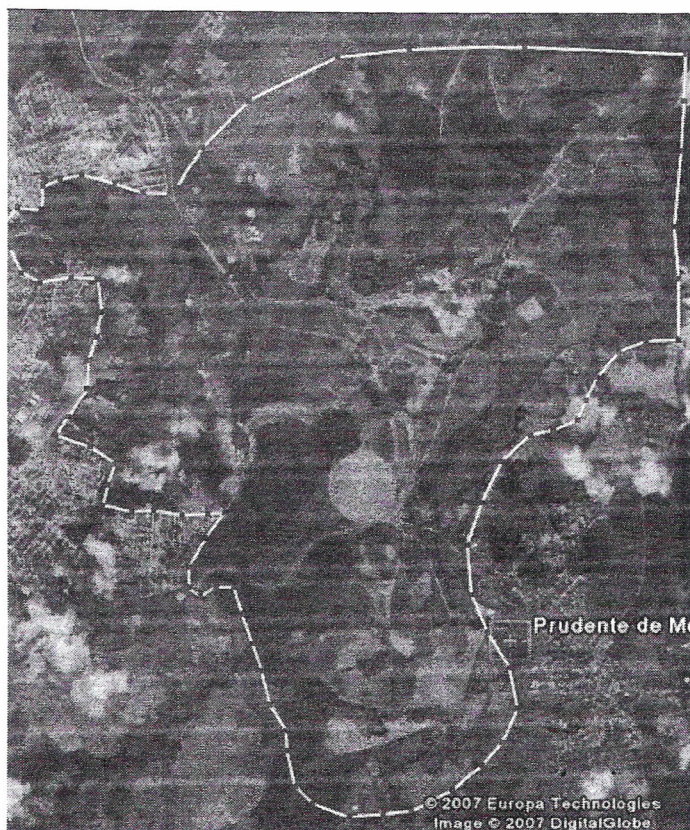


Figura 2: Vista aérea, com delimitação geográfica da região de interesse – Fonte: Google Earth

Na Figura 3, apresenta-se uma síntese da geologia da área através de mapa geológico preliminar, adaptado de Oliveira et al., (1991). Do ponto de vista geológico, encontram-se presentes rochas polimetamórficas, representadas por gnaisses diversificados, associados a granitóides e migmatitos. Essas rochas arqueanas cortadas por uma série de intrusões básicas e veios quartzofeldspáticos, de idades ainda não bem definidas, foram reunidas sob a denominação de Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiviso (Agngr) conforme Cabral (1994).

Grosso modo, sobre essas rochas depositaram-se os sedimentos que deram origem às rochas sobrejacentes, pertencentes ao Grupo Bambuí, atribuídas ao Proterozóico Superior. Segundo Tuller e Ribeiro (1992), citado em Cabral (1994), o Grupo Bambuí é subdividido, na área, em duas formações, a saber: Formação Sete Lagoas; e, Formação Serra de Santa Helena (NPbsh).

A Formação Sete Lagoas compreende uma seqüência de rochas carbonáticas, com intercalações de níveis argilosos, subdividida em dois membros:

- o Membro Pedro Leopoldo (NPbl), basal, que compreende calcários mais impuros, finos e claros, representados por calcissiltitos e, subordinadamente, calcarenitos e margas; e,
- o Membro Lagoa Santa (NPbls), superior, com calcários mais puros, grosseiros e escuros, compreendendo calcarenitos, e subordinadamente, calcissiltitos e calciruditos.

A Formação Serra de Santa Helena (NPbsh), resultante da sedimentação em águas calmas e profundas, possibilitou a constituição de estratos plano-paralelos, característicos dos seus metapelitos e metargilitos, que se assentam, em contato brusco, ou gradacional concordante, sobre os calcários da Formação Sete Lagoas. Em alguns locais capeiam as rochas do embasamento gnáissico-migmatítico, e em outros os calcários do Membro Pedro Leopoldo (Ribeiro et al., 2003).

Um conjunto de formações superficiais, terciárias e quaternárias, relacionadas a superfícies de aplainamento e à formação de planícies fluviais e cársticas, recobriu praticamente toda a área, preenchendo as depressões do paleorrelevo das rochas supracrustais e do embasamento cristalino, ou constituindo depósitos horizontais sobre as superfícies arrasadas dessas rochas. Trata-se de depósitos argilo-silticos de cobertura, depósitos argilosos em cavidades cársticas e aluviões e terraços aluvionários (Cabral, 1994). Nesse contexto situa-se a região de interesse para este estudo, circunscrevendo a área do campus experimental do CNPMS, onde serão realizadas partes dos trabalhos aqui propostos (Figuras 2 e 3).

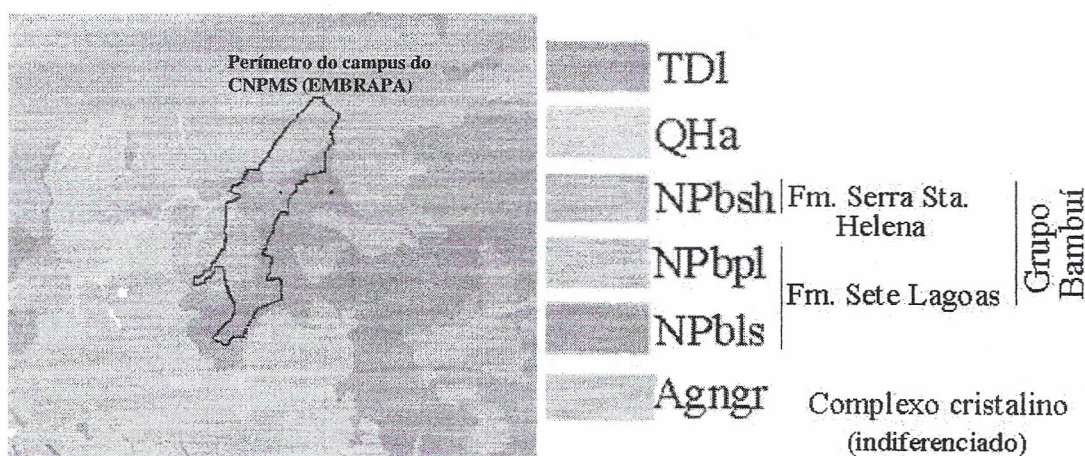


Figura 3: Mapa geológico preliminar, com a indicação do perímetro do campus do CNPMS.

Adaptado de Oliveira et al., (1991).

4. JUSTIFICATIVA

4.1 Qualidade da água

A qualidade das águas depende das condições geológicas e geomorfológicas e de cobertura vegetal da bacia de drenagem, do comportamento dos ecossistemas terrestres e de águas doces e das ações do homem. As ações do homem que mais podem influenciar a qualidade da água incluem as seguintes: (a) lançamento de cargas nos sistemas hídricos; (b) alteração do uso do solo rural e urbano; e, (c) modificações no sistema fluvial (Filho, 1997; Tucci et al., 2001).

A água, considerada o solvente universal, é quimicamente muito ativa e tem bastante facilidade em dissolver e propiciar reações de muitas substâncias orgânicas e inorgânicas. Assim, ao

infiltrar-se pelos solos, pelas fissuras e fraturas das rochas, ou escoar-se pela superfície, se enriquece em minerais dissolvidos. Nessa trajetória, pode dissolver e transportar muitos poluentes e contaminantes.

Normalmente, as águas subterrâneas têm maiores concentrações de minerais dissolvidos que as águas continentais superficiais devido à sua baixa velocidade de circulação, à temperatura e pressão a que estão submetidas, e à facilidade de dissolver o CO₂ presente no solo não saturado (Domenico e Schwartz, 1990; Feitosa e Filho, 1997).

A qualidade da água, de modo geral, é resultante de fenômenos naturais e da ação antrópica. Pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é função do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica. À qualidade existente de uma determinada água contrapõe-se a qualidade desejável, que é função dos usos previstos pela legislação (Von Sperling, 2005). Dentre esses usos pode-se destacar o abastecimento doméstico e a irrigação de culturas, em particular aquelas que se destinam à alimentação humana e animal.

O padrão de potabilidade compreende critérios essenciais e complementares. Os critérios essenciais relacionam-se, principalmente, à proteção contra a poluição por substâncias tóxicas ou venenosas e à contaminação por microorganismos patogênicos. Os complementares visam ao aperfeiçoamento da qualidade da água, naquilo que se relaciona aos aspectos desejáveis, mas não essenciais à manutenção da saúde pública, tais como aspectos estéticos, propriedades organolépticas e outros (Feitosa e Filho, 1997).

Os padrões de qualidade ambiental das águas visam fundamentalmente à proteção da saúde pública e ao controle de substâncias e organismos potencialmente prejudiciais à saúde humana (Feitosa e Filho, 1997). Desta forma, as águas são consideradas potáveis quando podem ser consumidas pelo ser humano sem acarretar riscos à sua saúde.

Atualmente, os padrões de qualidade e de potabilidade das águas, em território brasileiro, estão determinados pela resolução N.º 357, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, de 17 de março de 2005 e portaria N.º 518 do Ministério da Saúde, de 25 de março de 2004, que ainda estabelece o controle e vigilância da qualidade da água para abastecimento público.

Os padrões de qualidade da água para a irrigação são mais simples do que os respectivos padrões para o abastecimento doméstico, pois é considerado um menor número de parâmetros. Grosso modo, na classificação das águas para fins agrícolas, consideram-se os seguintes parâmetros: sais dissolvidos; condutividade elétrica; concentração total de cátions; e as concentrações dos íons borato, cloreto, potássio, sódio e sulfato (Feitosa e Filho, 1997).

No universo do agronegócio, a mídia tem destacado o grande avanço tecnológico, o qual permite obter recordes de produção, a cada nova safra. No entanto, não tem sido dado um destaque, com a mesma ênfase, para os problemas ambientais oriundos do uso excessivo de agroquímicos, de

práticas agrícolas impróprias e de agressões ao ambiente, que comprometem a qualidade dos solos, das águas superficiais e subterrâneas, e do ar atmosférico.

O setor tecnológico e científico relacionado às atividades agropecuárias, em particular à de grande escala, tem desenvolvido alternativas para reduzir impactos ambientais deletérios, especialmente no que tange ao uso excessivo e inadequado de agroquímicos, inclusive relativamente à manipulação e descarte de produtos potencialmente perigosos e de suas embalagens e no manejo de solos e culturas.

Não é fato novo que o crescimento da população mundial acarretou a necessidade de aumentar a produção de alimentos. No Brasil, isto refletiu na expansão desordenada da fronteira agrícola em direção oeste-noroeste. Grandes áreas de cerrado e de florestas foram ocupadas com a implantação de pastagens e culturas de exportação. Nessas áreas, a expansão da produção tem ocorrido com o uso intensivo de fertilizantes, corretivos, herbicidas e pesticidas.

As quantidades aplicadas de agroquímicos crescem ano a ano, colocando o país no topo da lista dos maiores consumidores mundiais. Ora, o uso excessivo e descontrolado de agroquímicos na lavoura e na pecuária é um importante fator de contaminação ambiental, em particular dos solos e das águas superficiais e subterrâneas.

A sociedade organizada não desconhece que água de boa qualidade é um recurso natural finito e que extensas áreas, outrora agricultáveis, estão sob processo de erosão intensa e mesmo de desertificação.

A preservação dos recursos hídricos e dos solos é um tema na ordem do dia, tanto na mídia nacional, quanto na internacional. Já admitem que a escassez de água, num futuro não muito distante, poderá acarretar conflitos de proporções significativas.

Tratar os mananciais que são utilizados para suprir as necessidades e atividades tanto antrópicas como naturais, de forma sustentável, deve ser uma ação rotineira vista como uma prática saudável e bem-vinda.

É certo que boa parte da poluição dos corpos d'água deve-se, ao despejo de esgotos urbanos e industriais, e uma outra parte, pode ser atribuída, a práticas agropecuárias impróprias. Dentre essas podem ser destacadas: o uso excessivo e inadequado de agroquímicos; a remoção da cobertura vegetal dos solos; a destruição das matas ciliares e das vegetações protetoras de nascentes; o descaso com a conservação dos solos; as grandes obras de irrigação, como desvios, drenos e represamentos de água; e a disposição inadequada de resíduos e dejetos da pecuária intensiva.

A prática mundial do uso de agroquímicos por longos períodos, muitas vezes indiscriminada e abusiva, vem trazendo preocupações às autoridades públicas e aos envolvidos com a saúde pública e sustentabilidade dos recursos naturais, em consequência da contaminação ambiental (UETA, et al. s.d.).

4.2 Aspectos hidrogeológicos

Sob o ponto de vista hidrogeológico e hidrodinâmico, trabalhos recentes, de Silva e Loureiro (2003) e de Pessoa e Loureiro (2005), foram desenvolvidos na área de influência da mina Lapa Vermelha, no município de Lagoa Santa, ou seja, em área de contexto geológico semelhante à da estação experimental do CNPMS.

A mineração de calcário é uma atividade industrial bastante comum em toda a região, desde a vertente sul da Serra de Santa Helena, a noroeste da cidade de Sete Lagoas, até os limites da cidade de Lagoa Santa, já na região metropolitana de Belo Horizonte.

Silva e Loureiro (2003) estudaram a influência desta atividade em uma área de 47km², sobrejacente ao aquífero cárstico, na região de Lagoa Santa. Conforme esses autores, tal estudo originou-se da necessidade de expansão da área de exploração da mineração e, por conseguinte, da necessidade de se conhecer os efeitos da lavra e do rebaixamento da superfície piezométrica, no sistema hidrogeológico local.

De acordo com Silva e Loureiro (2003), em 1992, as atividades de lavra, na mina Lapa Vermelha, atingiram a cota 735m, alcançando então o nível d'água nas rochas carbonáticas. Isto acarretou o aporte dessas águas à cava da mina, às quais se somam inundações, nos períodos de chuvas. Assim, foi implantado um sistema de bombas para o desaguamento do *pit*, de modo que as águas são aduzidas por cerca de 800m e descarregadas no interior do maciço carbonático.

Ora, é fato que no caso de calcários, em geral, os sistemas aquíferos são devidos a um conjunto de fraturas, fissuras e cavidades nas rochas carbonáticas, que podem se estender regionalmente, intercomunicando-se em subsuperfície, em diferentes locais.

Assim, operações de desaguamento podem afetar o aquífero, ou os sistemas aquíferos, em grande extensão. Especialmente, se considerarmos o conjunto de minas em atividade, na região. Soma-se a isso o fato de que essas águas podem conter uma diversidade de contaminantes carregados, por enxurradas e inundações, incluindo contaminantes originados de atividades agropecuárias e industriais.

A região de Lagoa Santa, segundo Pessoa e Loureiro (2005), é abastecida por águas subterrâneas captadas dos mananciais aquíferos cársticos, por dezenas de poços tubulares. Esses aquíferos produzem grandes quantidades de água, o que reflete sua condição de excelente meio condutor e mantenedor de água subterrânea.

Grosso modo, aqui está implícita a possibilidade da rápida recirculação de águas e da intercomunicação dos sistemas aquíferos.

Também, a captação de águas cársticas, por meio de poços tubulares, estende-se aos demais municípios na região, incluindo Sete Lagoas e Prudente de Moraes, portanto águas sujeitas a algum tipo de contaminação.

O mesmo acontece no CNPMS, onde o abastecimento de água potável é feito por meio de poços tubulares que captam água no manancial aquífero cárstico.

4.3 A questão dos agroquímicos

O mercado mundial de agroquímicos e de fertilizantes movimenta anualmente cerca de 30 e 50 bilhões de dólares, respectivamente. O Brasil é o quinto maior consumidor mundial de pesticidas, com uma despesa anual de cerca de 2,5 bilhões de dólares, neste setor. No contexto dos pesticidas, em geral, os herbicidas representam a maior parcela tanto no Brasil como em escala mundial. Admite-se que apenas uma pequena fração desses produtos atinja o alvo específico, enquanto a maior parte do total aplicado tem potencial para se mover, nos diferentes compartimentos ambientais, tais como o solo e águas residuais e subterrâneas (UETA, et al., s.d.).

As triazinas compreendem diversos derivados da substância base, sym-triazina, entre elas a atrazina, e são os agroquímicos de uso mais comum em escala global.

Herbicidas desse grande grupo de substâncias são usados na pré e pós-emergência da lavoura, para controle de ervas daninhas. Cerca de 30% dos herbicidas agrícolas, comercializados mundialmente, são triazinas. O uso dessas substâncias remonta a 1952, quando foi sintetizada e seus primeiros derivados obtidos. A partir daí, o espectro de triazinas comerciais ampliou-se enormemente (Pacáková et al., 1996).

Em 1970 foram publicadas as primeiras discussões sobre suas propriedades e de seus resíduos, focalizando sua eficiência como herbicida e os aspectos econômicos de seu uso na agricultura, desde então as discussões ampliaram-se. Atualmente, já há conhecimento dos perigos ecológicos e para a saúde, relacionados ao seu uso. Isto está refletido, no banimento de algumas triazinas de certos países. Na Alemanha, desde 1991 foi proibido o uso de terbutilazina, em áreas de proteção de mananciais, e as concentrações permitidas, em águas potáveis, são da ordem de 0,1 µg/l. Em todos os lugares há grande demanda pelo monitoramento sistemático de pesticidas e das substâncias residuais (Pacáková et al., 1996).

Conforme suas características físico-químicas, os resíduos dos agroquímicos presentes na água podem ser adsorvidos pelo material particulado em suspensão, ou depositar nos sedimentos do fundo, ou ser absorvidos por organismos e entrar na cadeia alimentar. Esses resíduos podem, ainda, ser transportados para longe das áreas de aplicação, pelas águas superficiais e subterrâneas, ou mesmo nos corpos dos organismos aquáticos. Alguns agroquímicos e seus resíduos podem, também, retornar à atmosfera por volatilização. Assim, existe uma interação contínua entre os agroquímicos, seus resíduos e o meio em que se encontram, influenciada por agentes ambientais, tais como a biota, a temperatura, os ventos, as chuvas e outros. Desta interação pode resultar um maior tempo de exposição dos organismos, ou mesmo dos seres humanos, às substâncias e seus metabólitos potencialmente perigosos (Nebel e Wright, 1998).

Os solos também têm sido contaminados com a disposição inadequada das mais diversas substâncias químicas, tais como metais pesados, substâncias químicas sintéticas de toda sorte, resíduos industriais diversos, lixo urbano, e muitos outros materiais, com potencial de contaminação intensa. As fontes dessas substâncias são as mais diversas possíveis, desde a residência urbana, passando pela indústria, inclusive a de mineração, até a propriedade agrícola de produção intensiva no mais distante rincão. Além da disposição inadequada, muitas vezes essa disposição é clandestina, ou mesmo criminosa, dada a natureza do material disposto. Isso certamente cria sérias dificuldades para os órgãos ligados à fiscalização e preservação ambiental, tanto na identificação como delimitação dos problemas causados.

O uso adequado do solo deve ser encarado sob uma ótica ambiental ampla. Devem ser estabelecidos limites para as atividades antrópicas, que possam interferir na capacidade do solo de funcionar como um meio de assimilação ambiental. A preocupação com a possível escassez de água tem despertado a atenção sobre o papel do solo para sua captação e purificação. Certamente, o cuidado com o solo é uma etapa importante no cuidado com a água (Raij, 2003).

No CNPMS são conduzidos cultivos experimentais, que requerem irrigação e o uso de adubos, de diversas formulações em nitrogênio, fósforo e potássio, chamados genericamente, NPK e também de herbicidas, em particular a atrazina (Comunicação Oral). Esse herbicida é classificado, como “medianamente tóxico”, de acordo com o Sistema de Informações de Agrotóxicos – SIA, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA.

Por um lado, os adubos de formulação NPK contêm nitrogênio, em geral, como nitrato de sódio, ou de potássio ou de amônio. Qualitativamente, sob o ponto de vista químico, os nitratos têm solubilidade elevada em água. O íon nitrato é bastante móvel, não sendo praticamente adsorvido pelas partículas minerais e pela matéria orgânica do solo (McBride, 1994). Portanto, as frações não metabolizadas por bactérias presentes no solo, e as não assimiladas pelo sistema radicular das plantas, podem migrar para horizontes mais profundos e alcançar as águas freáticas, e mesmo as cársticas.

Por outro lado, Ueta et al. (s.d.), afirmam que a maior parte do total aplicado de herbicidas tem potencial para migrar dentre os diversos compartimentos ambientais. Contudo, segundo Crosby (1998), essa migração depende do tipo de metabólito formado na degradação ambiental da substância.

Ora, pode-se pressupor que uma parte da atrazina utilizada em experimentos conduzidos no CNPMS pode migrar para os solos, e, daí, para as águas subsuperficiais e subterrâneas.

De acordo com Crosby (1998), os íons nitrato constituem uma das principais fontes de radicais hidroxila, HO•, atualmente um oxidante muito comum nas águas naturais. Esses radicais

são gerados fotoquimicamente, por uma variedade de rotas naturais, que incluem a reação de Fenton e a fotólise dos íons nitrato e nitrito, conforme representado pelas Equações 1 e 2.



Apesar das concentrações de equilíbrio dos radicais hidroxila serem extremamente pequenas nas águas naturais, sob ação da luz solar, sua contínua geração, aliada à alta reatividade, as tornam dominantes em muitos processos oxidativos aquáticos (Crosby, 1998).

Esses radicais podem ser prevalentes nas áreas agrícolas, como as do CNPMS e, portanto, um fator importante na degradação de pesticidas. A ação ambiental dos resíduos gerados nesse processo pode ser desconhecida e deletéria.

O grau de vulnerabilidade do aquífero é função, do tipo da associação entre as propriedades físicas do sistema aquífero, tais como: permeabilidade das rochas; grau de fraturamento; desenvolvimento dos espaços de dissolução; direção e tipo de fluxo subterrâneo; desenvolvimento da superfície topográfica; e, espessura e porosidade do material de cobertura (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 1994).

Possivelmente, nesta função, devem ser consideradas as taxas de recarga e de exploração do aquífero. Assim, a migração de contaminantes, através do solo e do sistema aquífero poderá ocorrer, com maior ou menor intensidade.

De acordo com Segura e Loureiro (1997), a atividade agrícola exerce grande influência no ecossistema solo, na qualidade das águas subterrâneas e controla fortemente as taxas de recarga do aquífero. Assim, tem um grande potencial para produzir efeitos indesejáveis nesse recurso natural. Ainda, muitas práticas agrícolas podem causar contaminação, em grande extensão, por nutrientes e/ou praguicidas, especialmente, no caso de aquíferos não confinados, em que a zona saturada é pouco espessa e o solo tem textura e estrutura que favorecem a percolação das águas de infiltração.

Ora, na região em questão, os planaltos cársticos constituem a mais importante área de recarga do carste, com circulação rápida de águas de infiltração e, conseqüentemente, grande potencial de contaminação (CPRM, 1994).

“A contaminação dos aquíferos é um problema que ainda não é bem avaliado no País. Com o uso generalizado de fossas, com a implantação de aterros sanitários e de pólos industriais petroquímicos, os aquíferos tenderão a se deteriorar, ainda mais. As principais cargas de poluição afluentes às águas interiores podem ser pontuais ou difusas. As cargas pontuais se devem a: (a) efluentes da indústria; (b) esgoto cloacal e pluvial. As cargas difusas se devem ao escoamento rural e urbano, distribuídos ao longo das bacias hidrográficas. As cargas podem ser de origem orgânica ou inorgânica. As cargas orgânicas têm origem nos restos e dejetos humanos e animais e na matéria

orgânica vegetal. As cargas inorgânicas têm origem nas atividades humanas, no uso de pesticidas, nos efluentes industriais e na lavagem pelo escoamento de superfícies contaminadas, como áreas urbanas” (Tucci et al., 2001).

De acordo com o exposto, podem ser destacadas, *a priori*, a seguintes questões:

- do total de agroquímicos utilizados, nos cultivos experimentais, quanto é degradado, quanto é retido no solo e quanto alcança as águas subterrâneas?;
- qual a probabilidade de contaminação do sistema aquífero local, em particular do aquífero cárstico?;
- qual a probabilidade de contaminação das águas subterrâneas, regionalmente?;
- a exploração das águas subterrâneas influencia a taxa de migração dos contaminantes, no sistema aquífero?; e,
- o consumo das águas subterrâneas, nas atividades domésticas pode conferir risco à saúde das pessoas?

O desenvolvimento dos trabalhos propostos no convênio, e sumarizados neste artigo poderão, contribuir para esclarecer, em parte, essas questões e, ainda, além de pesquisadores e técnicos do CNPMS, subsidiar técnicos dos serviços locais de abastecimento e da COPASA, no desenvolvimento de estratégias para o monitoramento ambiental e para a gestão das águas superficiais e dos mananciais subterrâneos.

5. METODOLOGIA

A proposta metodológica do estudo, sintetizado neste artigo, estabelece como meta final uma tese de doutorado. Para tal, as atividades estão sendo realizadas segundo um desenvolvimento metodológico, que compreende as seguintes etapas: atividades de preparação que incluíram a obtenção, inventário e síntese das informações de base; pesquisa bibliográfica; trabalhos de campo e de escritório, conforme o organograma apresentado na Figura 3, adaptado de Loureiro e Castro (2007).

A execução de algumas das atividades de campo, estabelecidas no convênio, estão sob responsabilidade da COPASA, a saber: coleta mensal de amostras de águas superficiais e subterrâneas em pontos já definidos e a definir, análise físico-química e bacteriológicas das amostras, análise hidrobiológicas de amostras de águas superficiais; instalação e georreferenciamento de equipamentos de medições hidrológicas, em corpos d'água superficiais, lóticos e lânticos, em locais pré-determinados; perfuração e instalação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas através de poços medidores de nível d'água e piezômetros; e batimetria dos principais corpos d'água lânticos.

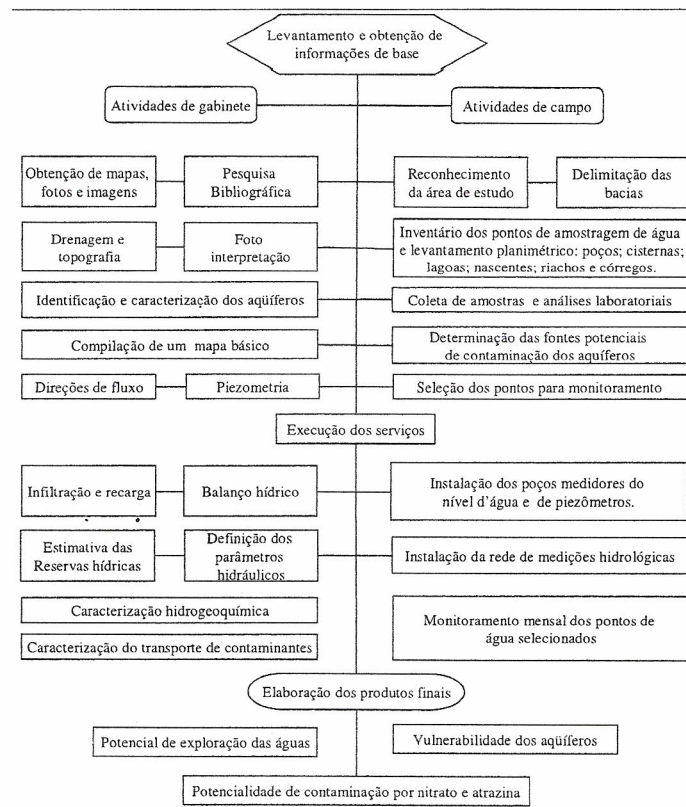


Figura 3: Organograma geral das atividades

Sob responsabilidade do CNPMS coube o suporte à realização de todas as atividades de campo, previstas no convênio, fornecimento de informações específicas pertinentes ao desenvolvimento dos trabalhos e estudos; realização de análises físico-químicas complementares; e trabalhos cartográficos.

O plano de monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, estabelecido no convênio, prevê a realização mensal das análises laboratoriais descritas nas Tabelas 1 e 2, conforme Domenico e Schwartz, (1990) e Santos, (1997), Santos, (1997) e Von Sperling (2005), respectivamente.

Finalmente, será apresentado o modelo hidrogeoquímico das águas locais, desenvolvido com auxílio do aplicativo computacional *PHREEQC2* (Parkhurst e Appelo, 1999) e o modelo de fluxo e transporte de agroquímicos, na área de influência do CNPMS, elaborado com auxílio do aplicativo computacional Visual MODFLOW® (Guiguer e Thomas, 1998).

Tabela 1. Substâncias químicas mais frequentes⁽¹⁾ nas águas subterrâneas^(*)

I) Constituintes principais ou maiores					
Bicarbonato	Carbonato	Ferro	Nitrato ²	Sódio	
Cálcio	Cloreto	Magnésio	Potássio	Sulfato	
II) Constituintes secundários ou menores					
Borato	Compostos fenólicos ²		Fosfato	Sílica	
Brometo	Fluoreto		Manganês ³		
III) Constituintes traço					
Alumínio	Bário ⁴	Chumbo ⁴	Cobre ³	Mercúrio ⁴	Arsênio ⁴
Cádmio ⁴	Cobalto ³	Cromo ⁴	Molibdênio ⁴	Zinco ³	

1) Substâncias presentes com maior frequência na água subterrânea, que também podem estar presentes em águas superficiais.

2) Poluentes provenientes de fertilizantes, de fossas e esgotos sanitários, da oxidação de pesticidas, da degradação microbiana de herbicidas, de efluentes industriais.

3) Micronutrientes usados na agricultura

4) Elementos tóxicos

Tabela 2. Parâmetros adicionais de caracterização da qualidade da água

Grupos de Parâmetros	Determinações
Físico-Químicos Inorgânicos	pH, Eh (pE), Oxigênio Dissolvido (OD) Condutividade Elétrica, Cor, Turbidez Sólidos Totais Dissolvidos (STD) Acidez, Alcalinidade Total, Dureza Total Alcalinidade HCO_3^- , OH^- , CO_3^{2-} Nitrito, $\text{N}_{\text{amoniaco}}$, $\text{N}_{\text{orgânico}}$, NH_4^+ Sulfeto
Físico-Químicos Orgânicos	DBO, DQO, Óleos e Graxas
Bacteriológicos	Coliformes Fecais, Coliformes Totais
Especiais	Atrazina
Excepcionais (hidrobiológicas)	Cianotoxinas

6. DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS

Em 2007 foi elaborado o projeto de pesquisa e formatado o convênio entre as instituições participantes, cujo documento final foi firmado em março de 2008.

Assim, em 2007, foram executadas algumas das atividades de preparação, a saber: inventário e síntese das informações de base, cujos produtos foram mapas preliminares, de campo, e o plano operacional de monitoramento de qualidade de água e de monitoramento hidrológico, que

inclui medições mensais da vazão dos ribeirões Matadouro e Jequitibá, em locais já estabelecidos, medições semanais do nível de água nas lagoas principais.

Foram inventariados 52 pontos de águas, com as respectivas coordenadas planimétricas, registro fotográfico e descrição detalhada de cada local, e 10 pontos de interesse cartográfico. Durante esse inventário, foram medidos o pH, a condutividade elétrica e o potencial de redox, das águas, em cada ponto.

Foi realizado, ao final do ano hidrológico, uma campanha de amostragem nesses pontos e as respectivas análises laboratoriais, de acordo com que estabelecido nas Tabelas 1 e 2, para subsidiar a seleção final dos pontos de amostragem, para monitoramento mensal, que foi em maio do ano corrente.

O monitoramento hidrológico deverá ser iniciado em agosto de 2008 e o estabelecimento dos poços medidores de nível d'água e piezômetros, deverão estar estabelecidos até outubro próximo, quando serão incorporados ao monitoramento mensal de qualidade das águas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Disponível em <www.ana.gov.br>. Acesso em fevereiro de 2007.

AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA–ANVISA. Disponível em <www.anvisa.gov.br/SIA>. Acesso em março 2007.

CABRAL, J. A. L. Informações Básicas para a Gestão Territorial – Região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, Minas Gerais. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Belo Horizonte. 1994
COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO–CBHS. Disponível em <www.cbhsaofrancisco.org.br/bacia>. Acesso em fevereiro 2007.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Vida: Viabilidade industrial e Defesa Ambiental. Município de Capim Branco: Informações Básicas para a Gestão Territorial – Região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, Minas Gerais. V.1. Belo Horizonte. CPRM. 1994.62p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Vida: Viabilidade industrial e Defesa Ambiental. Município de Capim Branco: Informações Básicas para a Gestão Territorial. Região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, Minas Gerais. V.2. Belo Horizonte. CPRM. 1994.128p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Vida: Viabilidade industrial e Defesa Ambiental. Município de Capim Branco: Informações Básicas para a Gestão Territorial. Região de Sete Lagoas e Lagoa Santa, Minas Gerais. Cartografia Geotécnica de Planejamento. Belo Horizonte. CPRM. 1994.84p.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. Deliberação Normativa N° 20. Diário do Executivo – Minas Gerais. 1997.

- CROSBY, D. G. *Environmental Toxicology and Chemistry*. New York. Oxford University Press. 1998. 336p.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F.W. *Physical and Chemical Hydrogeology*. Ed. John Wiley & Sons. NY. 1990.824p.
- FILHO, J. M. Contaminação das Águas Subterrâneas In: Feitosa Fernando, A. C.; Filho, J. A. (Ed.). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM- Serviço Geológico do Brasil. 1997. Cap. 6, p. 109–130.
- GUIGUER, N. e FRANZ, THOMAS. *Visual MODFLOW*. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada. 1998.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Plano Diretor da EMBRAPA Milho e Sorgo, 2004 – 2007. Sete Lagoas. 2005.
- LOUREIRO, C.O.; CASTRO, E. Estudo Hidrogeológico Ambiental, no Entorno da Área Experimental da EMBRAPA Milho e Sorgo em Sete Lagoas – Minas Gerais: Investigação do Comportamento do Nitrato e da Atrazina, no Solo e na Água Subterrânea. Projeto de Pesquisa em Convênio entre o Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA/UFMG, a Embrapa Milho e Sorgo – CNPMS e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA. Belo Horizonte, 2008.
- MCBRIDE, M. B.; *Environmental Chemistry of Soils*. v1. ed. Nova York: Oxford University Press. 406p. 1994.
- NEBEL, B. J.; WRIGHT, R. T. *Environmental Science*. 6ª ed. New Jersey. Prentice-Hall Inc. 1998. 698p.
- NETO, P. L. V.; ANJOS, N. F. R.; SOUZA, J. L.; CONEJO, J. G. L. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco. Agência Nacional das Águas. 2004.150p. Disponível em <www.ana.gov.br/prhbsf>. Acesso em março 2007
- NOGUEIRA, MARLY. A Dinâmica Funcional de um Lugar, na Rede Urbana de Minas Gerais. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003.
- OLIVEIRA, F. A.; RIBEIRO, J. H.; TULLER, M. P.; FILHO, A. D. PROJETO VIDA: Mapeamento Geológico da Região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matosinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente Morais, Confins e Funilândia – Minas Gerais. Relatório Final Escala 1:50000. 2ªed. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Belo Horizonte. 2003.
- PACÁKOVÁ, V.; ŠTULIK, K.; JISKRA, J. Review High-performance separations in the determination of triazine herbicides and their residues. *Journal of Chromatography A*. V. 754. p. 17-31. 1996.

- PARKHURST, DAVID L. E C.C.J. APPELO. User's guide to PHREEQC (Version 2) – A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, one-dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. U.S. Geological Survey. U.S. Department of the Interior. Denver, Colorado, USA. 326 pg. 1999.
- PESSOA, P. F. P.; LOUREIRO, C.O. Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos da Região de Lagoa Santa, MG. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2005. 356 pg.
- RAIJ, B. V. Solo e Meio Ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. Ribeirão Preto. 2003. Disponível em <[www.cnpma.embrapa.br /informativo/ index.php3](http://www.cnpma.embrapa.br/informativo/index.php3)>. Acesso em fevereiro de 2007.
- SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. In: Feitosa Fernando, A. C.; Filho, J. A. (Eds.). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM- Serviço Geológico do Brasil. 1997. Cap. 5. p81–108.
- SEGURA, J.E.S.; LOUREIRO, C.O. Avaliação da Vulnerabilidade da Água Subterrânea à Contaminação com Praguicidas - Uma Proposta Metodológica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 1997. 190p.
- SILVA, J. C. S.; LOUREIRO, C.O. Caracterização Hidrogeológica Ambiental da Área de Influência da Mina Lapa Vermelha na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2003. 270p.
- VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3ª Ed. V1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 2005. 452p.
- TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, IVANILDO; NETTO, O. M. C. Gestão da Água no Brasil. Brasília: UNESCO, 2001. 156p. <www.unesco.br/publicações>. Acesso em março 2007.
- UETA, J.; PEREIRA, N. L. ; SHUHAMA, I. K. ; CERDEIRA, A. L. Biodegradação de Herbicidas e Bioremediação Microrganismos Degradadores do Herbicida Atrazina. Disponível em <www.herbario.com.br/bot/toxicologia/biodegre.htm>. Acesso em fevereiro 2007.