

PROPOSTA DE REMEDIAÇÃO PARA A CONTAMINAÇÃO DE UM AQUÍFERO: ESTUDO DE CASO

Luciene Maria de Araújo Barros¹; Laura Albuquerque Acioli²;

Cleuda Custódio Freire² & Roberaldo Carvalho de Souza²

Resumo – O aquífero da Bacia Experimental do Córrego Engenho Nogueira, situada na região metropolitana de Belo Horizonte/MG, é utilizado como estudo de caso para a concepção deste trabalho. A região apresenta situações reais de contaminação por fosfato no aquífero. Nesse contexto, o trabalho desenvolve uma pesquisa que busca reconhecer as fontes poluidoras do sistema, consideradas inicialmente como sendo o “Galpão de Fósforo e Cal” e o trecho não canalizado do córrego do Engenho Nogueira; simula o comportamento do contaminante ao longo do lençol freático, utilizando o software MODFLOW (Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, McDonald e Harbaugh, 1988); e propõe possíveis soluções para a remediação do citado problema, embasadas nos resultados obtidos da simulação e no estudo desenvolvido sobre Remediações de Aquíferos.

Abstract – The ground water of the experimental *Engenho Nogueira* stream basin located within the Belo Horizonte-MG Metropolitan area is the subject of this study. Phosphate contamination has been identified within the ground water of that region. Following this context this research intends to recognize the pollution sources and to simulate the contaminant path along the ground water table using the software MODFLOW (Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, McDonald e Harbaugh) and propose remediated solutions to contamination problems. The results suggest that the *Galpão de Fósforo e Cal* and the non canalized stretch of Engenho Nogueira stream.

Palavras-chave – Contaminação, Remediação, Aquífero

¹ Universidade Federal de Alagoas; Campus A. C. Simões – BR104, km 14; CEP 57052-970; Maceió; AL; Brasil; (82) 214-1289

² Universidade Federal de Alagoas; Campus A. C. Simões – BR104, km 14; CEP 57052-970; Maceió; AL; Brasil; (82) 214-1289

INTRODUÇÃO

Os aquíferos são valiosos recursos naturais, sendo essencial o seu monitoramento constante, visando preservar suas características e evitar que a poluição e os contaminantes venham a impedir o uso dessa água em seu estado natural. Contudo, nem sempre os cuidados para a prevenção da poluição são tomados e, quando ela acontece, certas soluções devem ser empregadas com o intuito de reverter o processo e evitar prejuízos ainda maiores.

Para um melhor entendimento das medidas de proteção de recursos hídricos subterrâneos é importante que se conheça como os mesmos ocorrem, qual a sua participação no ciclo hidrológico, os tipos de aquíferos e qual o comportamento do fluxo da água no subsolo.

No contexto dessa problemática, procurou-se trabalhar com uma situação real de contaminação de aquífero, realizando estudos que auxiliassem na escolha de uma remediação viável para o problema.

A Bacia Experimental do Córrego Engenho Nogueira, situada na região metropolitana de Belo Horizonte/MG, foi utilizada como estudo de caso para a pesquisa. A região apresenta casos reais de contaminação por fosfato no aquífero e necessita de estudos que busquem reconhecer as fontes poluidoras e simular o comportamento do contaminante ao longo do lençol freático, visando propor soluções viáveis para a remediação desse problema. Essa é uma bacia experimental que possui poços de observação de onde são coletadas informações constantes sobre as características do aquífero. Isso possibilita uma maior facilidade de acesso aos dados necessários para a execução do programa MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988).

Com base nesses dados, o trabalho utiliza uma simulação do fluxo de águas subterrâneas e poluentes com o propósito de diagnosticar a poluição, estudar a pluma do fosfato e então propor possíveis soluções para a remediação do aquífero.

Revisão Bibliográfica

A problemática da contaminação das águas subterrâneas tem merecido grande atenção nos países desenvolvidos e, mais recentemente, no Brasil. Atualmente, no país, vêm sendo desenvolvidos vários trabalhos que tratam de estudos sobre a poluição nos aquíferos.

O pesquisador José Geraldo de Melo relaciona os principais problemas enfrentados pelas águas na Capital do Rio Grande do Norte, num trabalho intitulado de “Natal sofre com a contaminação das águas subterrâneas”. Em seu trabalho, o autor enfatiza: “Apesar da importância no suprimento hídrico da população de Natal, as águas subterrâneas estão ameaçadas à degradação, devido às atividades de desenvolvimento urbano, principalmente pela ausência de rede de esgotos e pelo processo de impermeabilização do terreno com obras de engenharia” (ABASINFORMA, março de

2002). O assunto é tratado também pelos pesquisadores Alberto Pacheco, João L.G. Figueira, Vivian Pellizari et al. no trabalho “A contaminação das águas subterrâneas pelos sistemas de disposição in situ - estudo preliminar”. O trabalho faz um estudo sobre a contaminação de aquíferos freáticos, que são usados no abastecimento para as atividades humanas, pelos de sistemas de disposição in situ, tais como fossas sépticas. Um outro trabalho está sendo desenvolvido na Capital do país, pelos pesquisadores Sérgio Koide, Sérgio Koide et al., com o título de “Monitoramento da contaminação da zona freática de área de aterro de lixo no distrito federal”. Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o monitoramento da qualidade da água da zona saturada da região, com vistas à verificação da extensão da pluma de contaminação e à possibilidade de que a qualidade da água dos córregos adjacentes à área estejam sendo contaminados pelo aterro. Uma outra pesquisa, cujo título é “Barreira hidráulica para contenção de plumas de contaminação”, realizada pelo Dr. Everton de Oliveira, realiza um estudo sobre o processo de remediação da contaminação de solo e água subterrânea pela utilização da barreira hidráulica (ABASINFORMA, abril de 2002).

Localização Regional da Área em Estudo

A área adotada como estudo de caso para o trabalho é o aquífero da Bacia Experimental do Córrego Engenho Nogueira, que já foi objeto de estudo de várias pesquisas (Marra, 2000; Vieira, 1999; Noce, Machado e Teixeira, 1994; Carvalho Filho, 1997; Cota, 2001 etc.) que serviram como base para o desenvolvimento deste trabalho. A bacia está situada na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, estando na sua maior parte dentro dos limites da Cidade Universitária da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, e está localizada nas proximidades da lagoa da Pampulha, como pode ser visto na Figura 1.

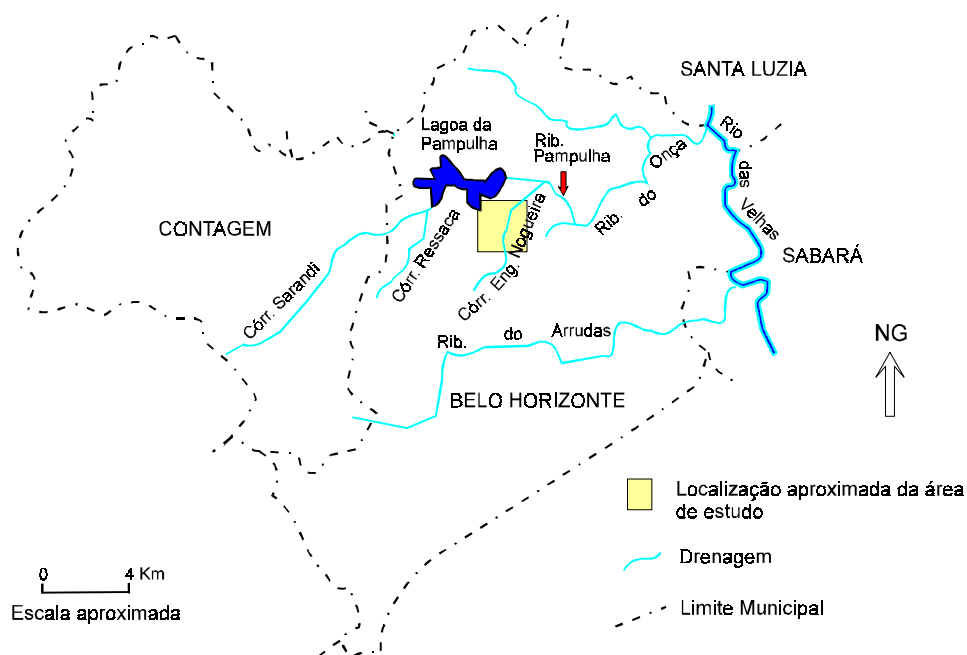


Figura 1. Bacia do Ribeirão Engenho Nogueira (Cota, 2001). A área em estudo está representada por um retângulo amarelo

A área pertence à bacia hidrográfica do córrego do Engenho Nogueira, sendo que este a corta no sentido Sul-Nordeste, percorrendo cerca de 2.400 metros, dos quais os últimos 1.500 metros de forma canalizada. Este córrego é tributário do ribeirão Pampulha. Como ilustrado na Figura 2, o contorno da área perfaz um polígono irregular, com cerca de 2,5 km², inserido num retângulo delimitado pelas coordenadas UTM 607.200 e 609.600 Oeste, e 7.800.800 e 7.804.000 Sul. O traçado irregular da área define o divisor hidrográfico da bacia.

Não existe no local nenhum uso agrícola para os solos, exceto as pequenas áreas de cultivo de forrageiras destinadas à escola de Veterinária da UFMG. Os terrenos não urbanizados são constituídos por arbustos de pequeno porte, existindo alguns pontos com vegetação mais densa e de maior porte, principalmente nos topos das colinas.

Esta área é o foco do projeto PROHBEN – Projeto Hidrogeológico da Bacia do Engenho Nogueira, Campus da UFMG – que tem como objetivo principal implementar nessa região uma bacia hidrogeológica experimental, capaz de possibilitar o treinamento de pesquisadores, técnicos e alunos de graduação e pós-graduação, a absorção e treinamento em novas tecnologias, metodologias e equipamentos, possibilitando o aumento na capacitação em estudos ambientais. Dentro deste enfoque, a área foi recentemente objeto de vários estudos, entre os quais destacam-se: caracterização hidrogeológica da bacia experimental, levantamento sistemático dos níveis de água subterrânea, programa de medições hidro-meteorológicas, caracterização físico-química e bacteriológica das águas superficiais e subterrâneas, caracterização hidrodinâmica do aquífero e modelagem do fluxo de

água e de transporte de contaminantes em meios porosos (Carvalho Filho *et al.*, 1996, Carvalho Filho, 1997).

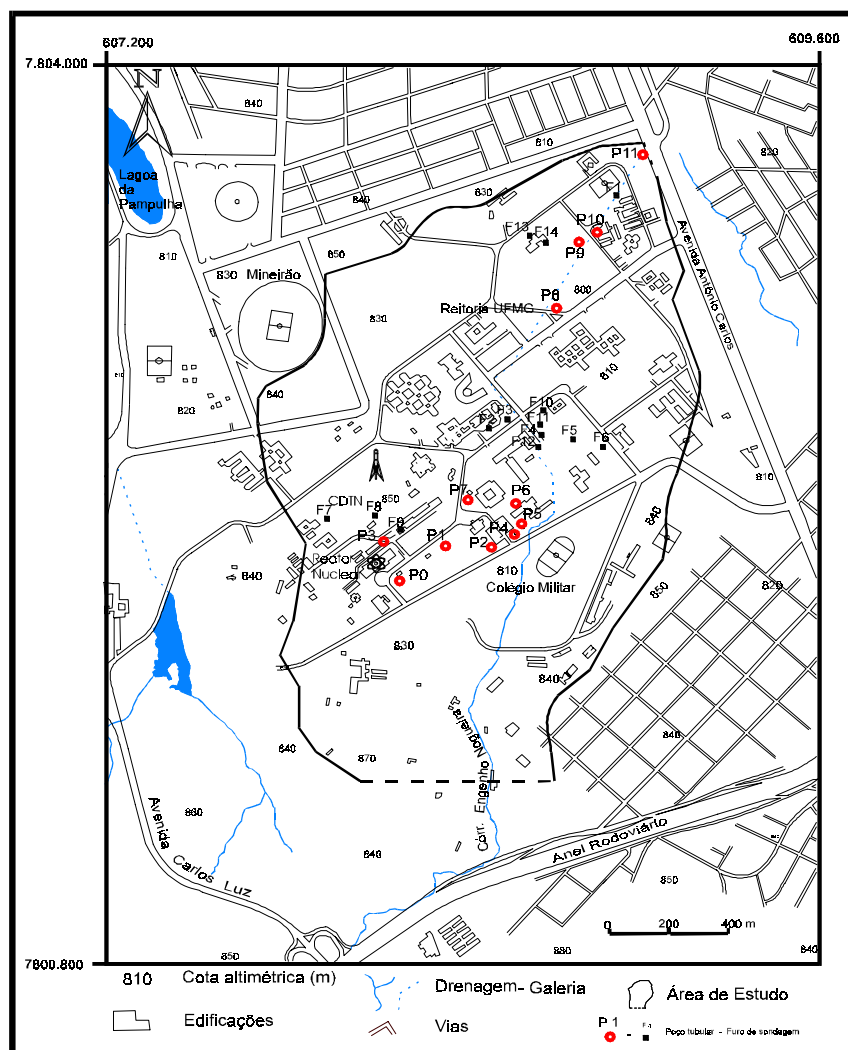


Figura2. Mapa de situação da área em estudo (Cota, 2001)

Modelagem Matemática do Aquífero

Criou-se um modelo utilizando como base o mapa da área mostrado na Figura 2 (um retângulo delimitado pelas coordenadas UTM 607.200 e 609.600 oeste, e 7.800.800 e 7.804.000 sul).

Utilizou-se uma **malha** retangular de 3,8km² de área para o modelo numérico. Essa malha contém células na direção x e y (linhas e colunas) refinadas de modo a obter a melhor definição nas delimitações do rio e dos drenos; foram utilizadas duas camadas na direção z, em profundidade. A camada superior ou camada 1 corresponde ao aquífero poroso granular, enquanto que a camada 2 representa o aquífero fissural.

Como **contorno da Bacia**, considerou-se os limites laterais da camada 1 (aquífero poroso) correspondentes aos limites hidrológicos da bacia. Já o aquífero fissural (2ª camada) tem sua ocorrência restrita às áreas posicionadas abaixo das faixas de drenagem presentes no terreno,

baseado no pressuposto de que a densidade do fraturamento tenderia a diminuir significativamente sob as colinas, caracterizando estas regiões como divisores hidrogeológicos para o aquífero, em relação ao fluxo subterrâneo (Carvalho Filho, 1997). No programa, foram marcadas como inativas as células externas ao contorno da bacia, caracterizando uma condição de contorno de fluxo zero.

O **relevo** do aquífero também entrou como dado para o programa. As configurações das duas camadas que constituem o aquífero dimensionam a malha em profundidade. Assim portanto, o topo da camada 1 é o relevo da superfície do terreno, enquanto que sua base é a mesma do topo da camada 2. Esses dados foram inseridos como arquivos *dxg*, sedidos pelo CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear).

As **propriedades Hidrodinâmicas** utilizadas foram: Condutividade Hidráulica Horizontal ($k_x=k_y$): 5×10^{-6} m/s; Condutividade Hidráulica Vertical (k_z): 5×10^{-8} m/s; Armazenamento Específico (Ss): 10⁻⁵; Rendimento Específico (Sy): 0,09; Porosidade Efetiva: 0,09 e Porosidade Total: 0,10 (propostas por Carvalho Filho, 1997). Elas foram inicialmente consideradas constantes para todas as células do aquífero, em ambas as camadas. Esses valores podem ser ajustados durante o processo de calibração do modelo.

No presente trabalho, o aquífero foi modelado pelo método de aproximação do meio poroso equivalente (MPE), no qual as porosidades primária e secundária e a condutividade hidráulica são substituídas por um meio contínuo de propriedades hidráulicas equivalentes, e que a princípio receberam valores iguais aos estabelecidos para a camada 1.

Os **poços tubulares de bombeamento e de observação** foram locados conforme dados cedidos pelo CDTN. A tabela 1 a seguir mostra a localização exata dos poços com relação à malha escolhida para a simulação.

Tabela 1. Coordenadas UTM e localização na malha dos poços.

Poço	Coordenadas UTM		Linha	Coluna
	X (m)	Y (m)		
P0	618190,00	7802165,00	121	21
P1	608345,00	7802260,00	112	37
P2	608490,00	7802270,00	110	51
P3	608164,00	7802262,00	111	19
P4	608585,46	7802319,26	107	61
P5	608612,95	7802347,10	103	65
P6	608604,00	7802420,00	96	63
P8	608720,20	7803115,13	61	77
P9	608790,58	7803352,02	39	82
P10	608838,64	7803376,05	35	87
P11	608979,40	7803666,16	8	100

Os poços P3 e P6 são de bombeamento, e estão atualmente em funcionamento. Estima-se uma exploração diária de 48m³ e 76m³ respectivamente para os poços P3 e P6, com 4 horas por dia de operação. Os demais poços são de observação

Foram utilizadas como **Condições de Contorno**:

Rio: Traçado na malha apenas do trecho não canalizado, somente nos domínios da camada 1. Considerou-se que a porção canalizada não possui comunicação hidráulica com o aquífero. Juntamente com o traçado foram inseridos os dados de elevação do nível da água, elevação do fundo do rio e condutância para cada uma das células abrangidas pelo córrego.

Tabela 2. Dados para a simulação do córrego Engenho Nogueira.

Posição	Elevação do nível da água(m)	Elevação do fundo da camada leito (m)	Condutância (m ² /dia)
Início	813,5	811	10
fim	803	800,5	10

Os valores da elevação do nível da água foram estimados a partir da análise de mapas topográficos. A elevação do fundo da camada leito foi calculada supondo-se 0,5 m de lâmina d'água no córrego e 2 m de espessura para a sua camada leito (Cota, 2001).

Drenos: Na tabela 3 estão os dados empregados para cada um dos 4 subsistemas de drenos (Cota, 2001), empregados apenas no aquífero poroso. Os rótulos “inicial” e “final” referem-se ao início e ao fim de cada uma dos quatro subsistemas de dreno, no sentido altimétrico ascendente.

Tabela 3. Dados gerais dos subsistemas de drenos. SD1 = Reitoria-Horto, SD2 = Veterinária-Reitoria, SD3 = CDTN-Reitoria e SD4 = COLTEC-ICEX velho.

Subsistema de Drenos	Elevação Inicial (m)	Elevação Final (m)	Condutância (m ² /dia)
SD1	794,6	789,1	5
SD2	798,6	794,6	5
SD3	800,6	794,6	5
SD4	799,1	797,2	5

Carga Constante: Todo o volume de água, superficial ou subterrâneo, proveniente do escoamento à montante, entra na área através da seção do extremo sul da Bacia. Neste local será considerada uma condição de contorno com carga especificada. Os valores da carga hidráulica são resultados de uma estimativa baseada tanto nos níveis da água subterrânea observados nos poços tubulares monitorados, quanto na declividade do terreno.

Tabela 4: Dados de entrada para a carga hidráulica constante.

Posição	Localização Inicial (m)	Localização Final (m)
Margem esquerda do córrego	822	815
Margem direita do córrego	815	822,5

Recarga: Os valores utilizados para a recarga da água subterrânea foram estimados com base na precipitação medida no período de dezembro de 1995 a novembro de 1996, de 1921,8 mm. A recarga anual foi estimada como sendo de 600 mm/ano para todas as células da malha. Este valor corresponde a uma taxa de cerca de 32% da precipitação.

Na Figura 4 estão representados o contorno da Bacia, os drenos, o trecho não canalizado do córrego, os poços e a carga constante, que foram inseridos no MODFLOW. A figura 5 foi gerada como resultado da simulação do fluxo no aquífero. As setas indicam a direção fluxo, sendo que as verdes retratam fluxo no plano, as vermelhas o fluxo ascendente e as azuis o fluxo descendentes.

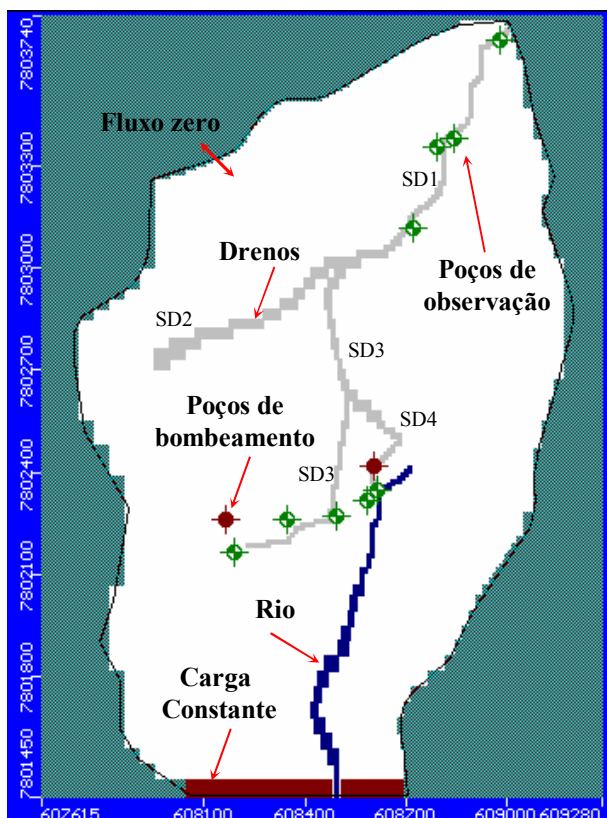


Figura 3– Posição dos poços, rio, drenos e carga constante.

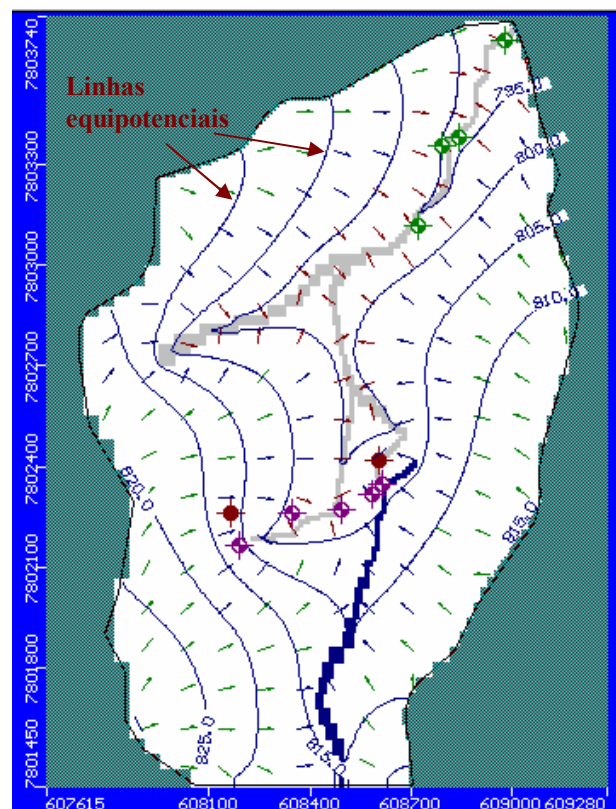


Figura 4 - Mapa com as linhas equipotenciais na camada 1 e setas que indicam a direção fluxo,

Calibração do Modelo

Após a simulação do fluxo no aquífero foi observada, através do gráfico de correlação entre os dados calculados pelo modelo e os dados obtidos em campo, a necessidade de calibração do programa. Os dados foram manipulados de modo a se estabelecer um novo conjunto de valores, capazes de permitir ao modelo uma melhor reprodução das alturas médias dos níveis freáticos observados nos poços monitorados no período de dezembro/95 a novembro/96.

De posse dos valores de carga hidráulica, calculados pelo MODFLOW, e dos dados de nível freático medidos nos poços de observação, pôde-se plotar, com o auxílio do Excel, um gráfico de correlação entre esses resultados, conforme mostrado na Figura 5.

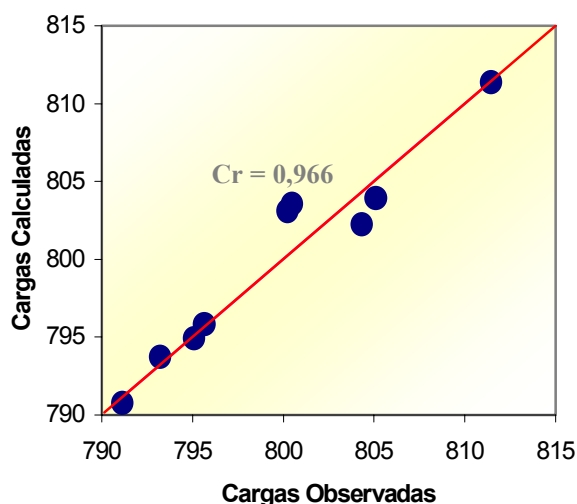


Figura 5 – Gráfico de correlação entre os dados calculados pelo modelo e observados nos poços de monitoramento. O coeficiente de correlação foi igual a 0,966

Na tabela 6 foi feita uma comparação entre os valores assumidos inicialmente para os parâmetros hidrodinâmicos e de contorno e os valores assumidos após a calibração.

Tabela 6. Comparação entre o conjunto de valores definidos inicialmente no modelo, antes do processo de calibração, com aqueles resultantes dos ajustes feitos na calibração.

Camada	Parâmetro	Valor pré-calibração	Valor pós-calibração	Razão
Aqüífero poroso granular – camada 1	Condutividade Hidráulica Horizontal (kx e ky)	5×10^{-6} para todo o aqüífero	5×10^{-6} no geral 3×10^{-6} na lente de argila	1 0,6
	Condutividade Hidráulica Vertical (kz)	5×10^{-8} para todo o aqüífero	5×10^{-8} no geral 3×10^{-8} na lente de argila	1 0,6
	Produção Específica	0,09	0,09	1
	Condutância do rio	$14 \text{m}^2/\text{dia}$	$14 \text{m}^2/\text{dia}$	1
	Condutância dos drenos	$10 \text{m}^2/\text{dia}$	$10 \text{m}^2/\text{dia}$	1
	Recarga	600mm/ano	600mm/ano	1
Aqüífero fissural – camada 2	Condutividade Hidráulica Horizontal (kx e ky)	5×10^{-6} para todo o aqüífero	2×10^{-6} para todo o aqüífero	0,4
	Condutividade Hidráulica Vertical (kz)	5×10^{-8} para todo o aqüífero	2×10^{-8} para todo o aqüífero	0,4
	Produção Específica	0,09	0,09	1
	Armazenamento Específico	$1 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$	$1 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$	1

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE FOSFATO NO AQÜÍFERO

Concluída a modelagem do fluxo da água subterrânea no aqüífero, iniciou-se a etapa de simulação do transporte do contaminante fosfato. Para simular o transporte de contaminantes na região da bacia, foi selecionado o código MT3D – A Modular Three-Dimensional Transport Model

for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems (Zheng, 1990).

Utilizou-se a distribuição de velocidades em regime permanente, justificada devido à falta de dados do fluxo ao longo de todo o período simulado. Além disso, como a simulação de transporte envolve longos períodos de tempo, as pequenas variações transientes no fluxo geralmente não exercem grande influência na condução do contaminante, sendo apenas necessário utilizar os valores médios de velocidade para considerar a parte advectiva do transporte.

Considerou-se a concentração inicial nula para todo o aquífero, para se poder, então, determinar a pluma formada a partir das fontes de contaminação após determinados períodos de tempo. Estipulou-se duas fontes primárias de contaminante, o trecho não canalizado do córrego do Engenho Nogueira e o Galpão de Fósforo, conforme a Figura 5. O córrego foi simulado a partir do contorno inferior da bacia até o ponto a partir do qual este é canalizado, ou seja, entre o poço de monitoramento P5 e o poço de bombeamento P6. O Galpão de Fósforo foi localizado à montante do poço de monitoramento P0.

Foi fixada uma concentração unitária constante nas células correspondentes a essas fontes. O uso da concentração unitária se deve à dificuldade de caracterizar as quantidades de contaminante potencialmente entregues pelas fontes. Assim, a concentração unitária permite a formação de uma pluma composta por concentrações relativas, possibilitando a comparação quali-quantitativa com os valores medidos.

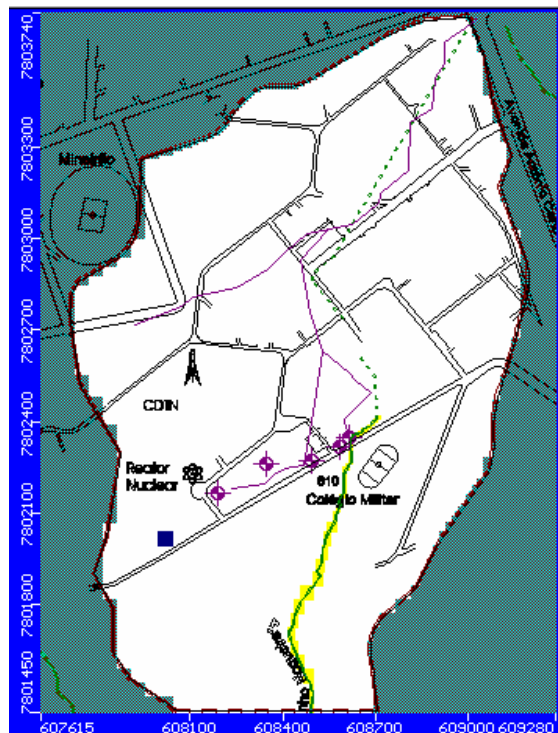


Figura 5. Mapa com as fontes de contaminação. Em azul, observa-se o galpão de fósforo, e em amarelo, o rio.

Foram utilizados valores típicos da literatura para a dispersividade (CPRM, 1997)., Visando obter uma medida da sensibilidade do modelo ao valor desse parâmetro, foram simulados dois valores para a dispersividade longitudinal: 1 e 10 metros. Para a dispersividade transversal horizontal e vertical, utilizou-se o valor de 10% da dispersividade longitudinal. Essa relação é relativamente bem aceita na literatura, onde se recomenda utilizar valores de 1 a 2 ordens de magnitude menores para as dispersividades transversais do que a dispersividade longitudinal.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS FINAIS

Na primeira simulação considerou-se a dispersividade longitudinal de 1 metro, para um tempo de simulação de 10 anos. A Figura 6 mostra as linhas de isoconcentração resultantes das fontes de contaminação simuladas.

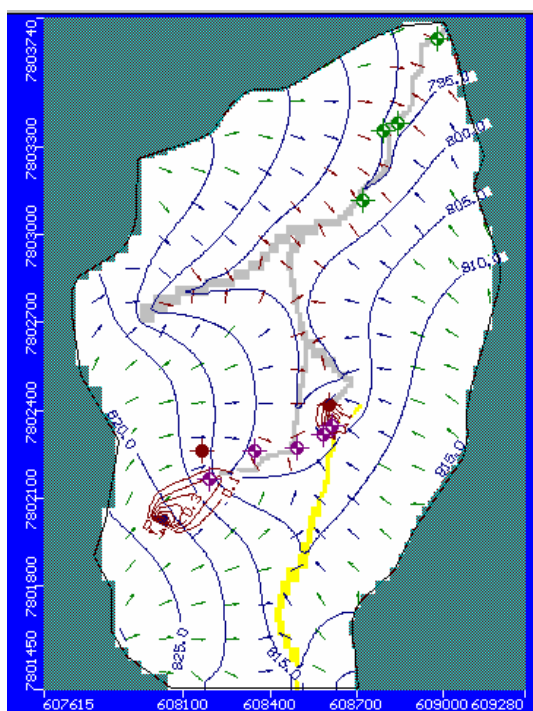


Figura 6. Visão geral das plumas de contaminante. Tempo de simulação de 10 anos.

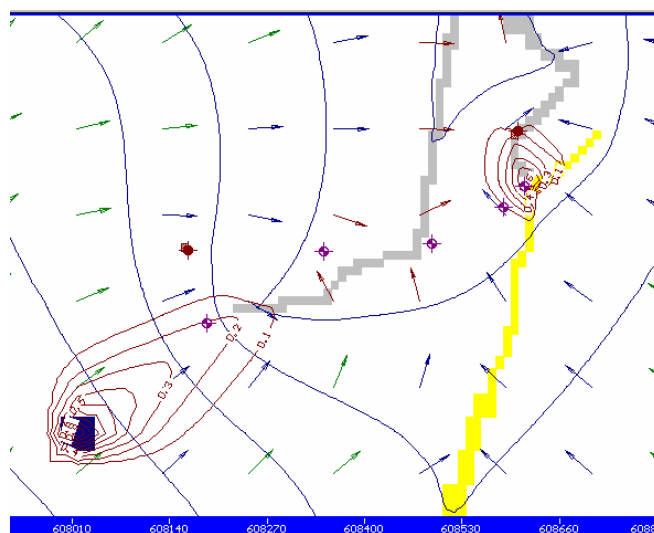


Figura 7. Detalhe das plumas de contaminante. Tempo de simulação de 10 anos.

Pode-se verificar que o contaminante liberado em ambas as fontes convergiu para o centro do domínio simulado. Isso era previsto devido ao gradiente hidráulico gerado pelos drenos e bombeamentos. Verifica-se também que o cone de depressão formado pelos drenos e bombas conteve as plumas, tanto no galpão de fósforo quanto no rio, conforme a Figura 7.

Através das análises de campo, observou-se que o fluxo do fosfato atingiu os poços P0, P4, P5 e P6. Isso pode ser comprovado também segundo o resultado simulado, conforme visto na Figura 7.

Observou-se ainda que a pluma de contaminante não atingiu consideravelmente o aquífero fissural, o que pode ser comprovado analisando-se as Figuras 8 e 9, que mostram o perfil da bacia, próximo ao Galpão de Fósforo e próximo ao poço P6, respectivamente.

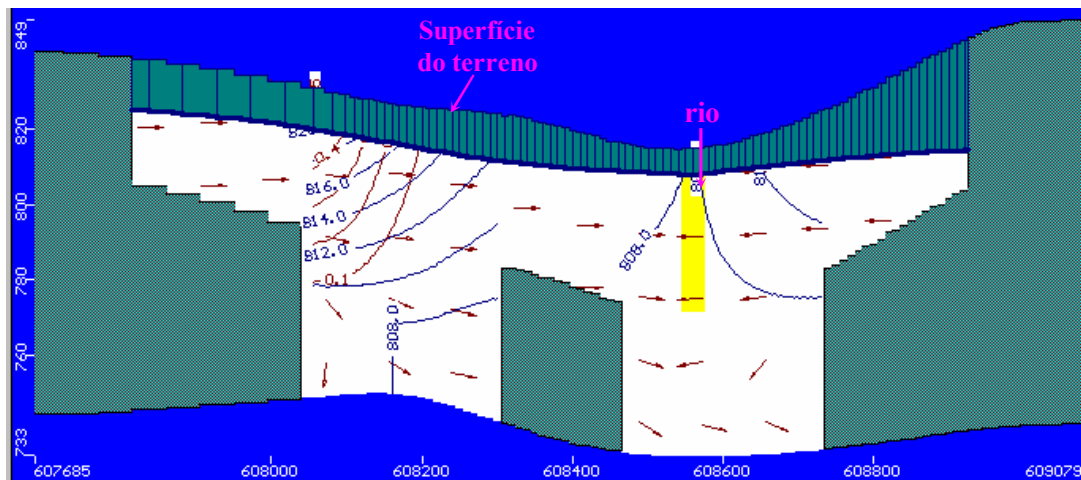


Figura 8. Corte vertical na seção 7.802.056,6, próximo ao galpão de fósforo. Tempo de simulação de 10 anos.

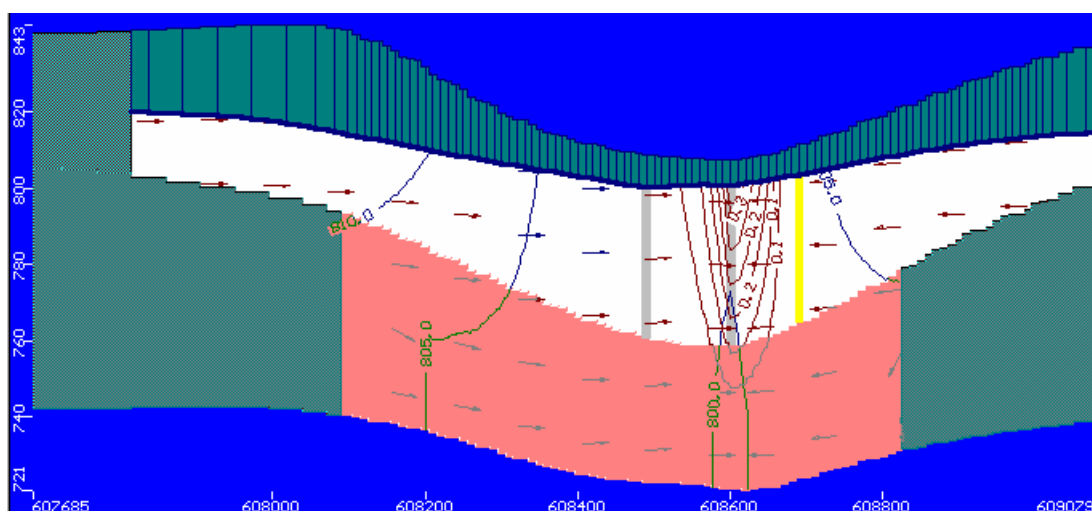


Figura 9. Corte vertical na seção 7.802.390,3, próximo ao poço P6. Tempo de simulação de 10 anos.

Julgou-se ainda conveniente simular o fluxo de contaminante para o tempo de 20 anos, a fim de verificar a influência do tempo na magnitude da pluma no aquífero. Esses resultados podem ser observados na Figura 10.

Conforme fica ressaltado na comparação entre as Figuras 7 e 10, o aumento do tempo de fluxo do contaminante apenas alongou ligeiramente a pluma na região do córrego, elevando a concentração de fosfato nos poços P5 e P6. Já a pluma originada do galpão de fósforo não mostrou alterações em sua forma.

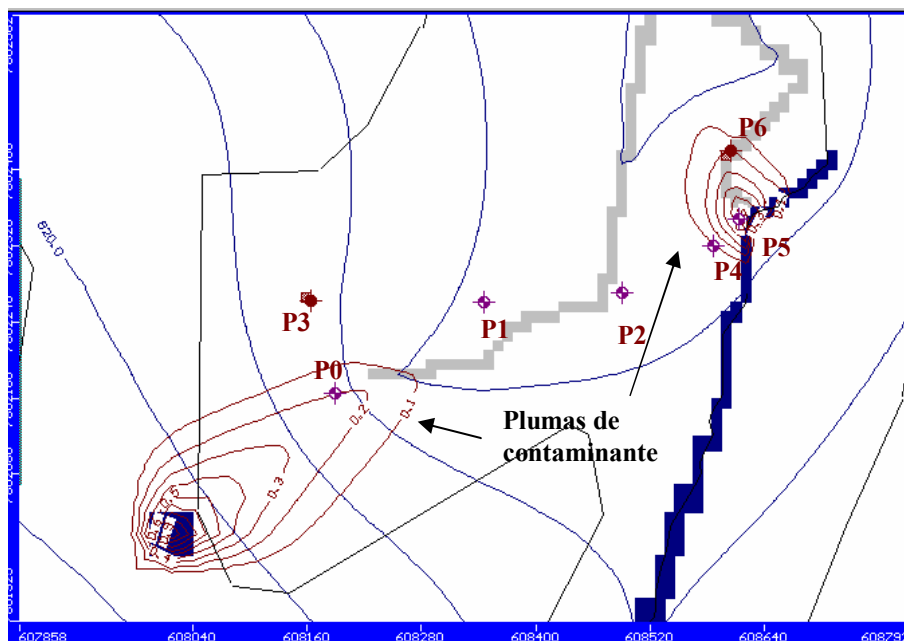


Figura 10. Detalhe das plumas de contaminante. Tempo de simulação de 20 anos.

No intuito de determinar a sensibilidade da pluma contaminante à variação no valor da dispersividade, simulou-se também o fluxo do contaminante para uma dispersividade longitudinal de 10m e transversal de 1m, tanto para o tempo de simulação de 10 anos quanto para o de 20 anos. Os resultados dessas simulações estão apresentados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

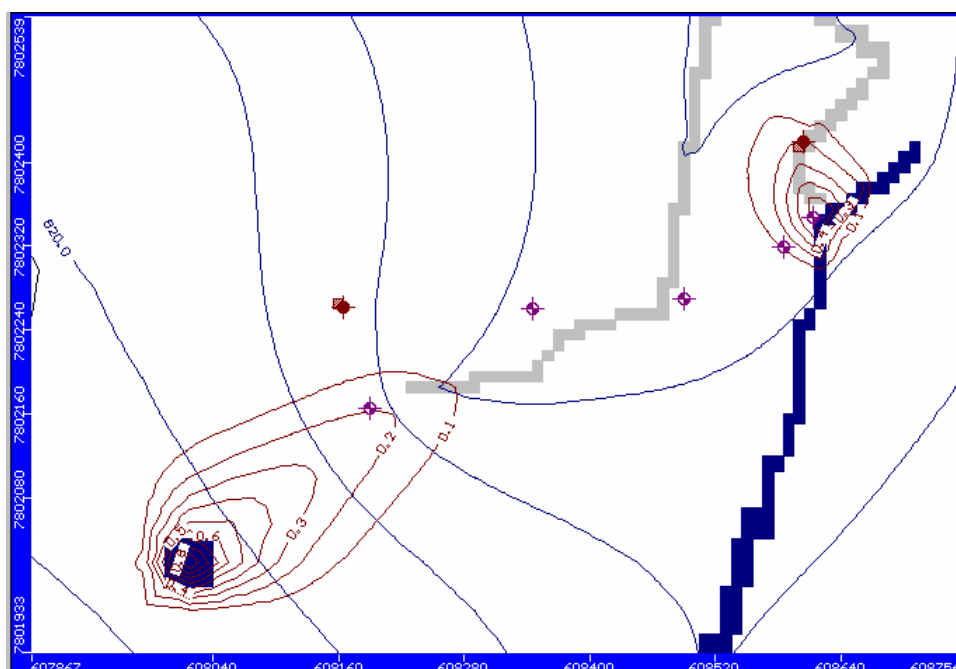


Figura 11. Detalhe das plumas de contaminante. Tempo de simulação de 10 anos e dispersividade longitudinal de 10m.

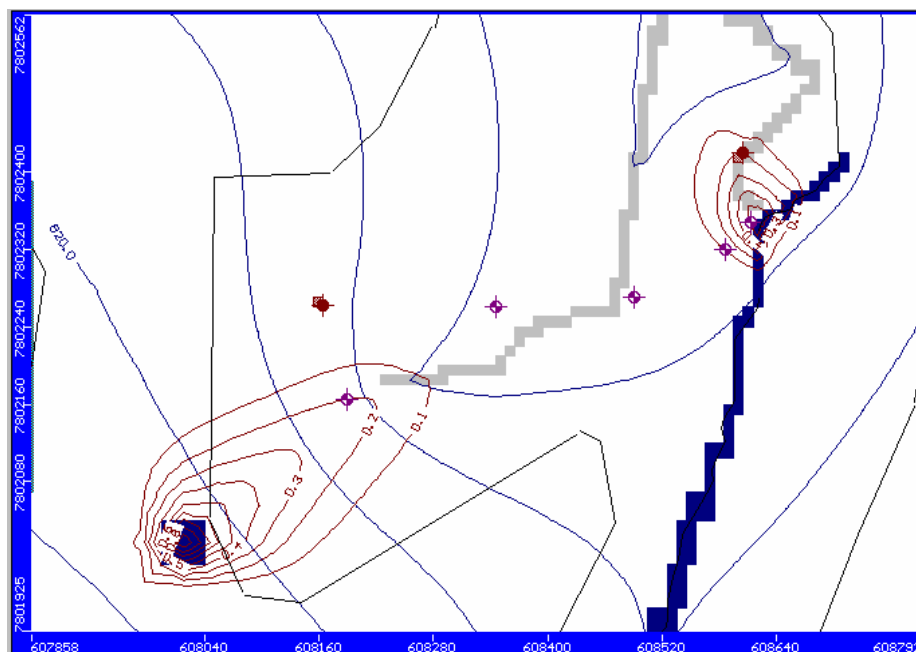


Figura 12. Detalhe das plumas de contaminante. Tempo de simulação de 20 anos e dispersividade longitudinal de 10m.

De acordo com o que pode ser observado nas Figuras 7, 10, 11 e 12, a dispersividade não é um fator determinante no comportamento da pluma, nem no tempo de simulação de 10 anos, nem no de 20 anos.

PROPOSTA DE REMEDIAÇÃO DO FOSFATO NO AQUÍFERO

O passo inicial para a remediação do aquífero do córrego Engenho Nogueira seria o isolamento ou retirada do fósforo que se encontra estocado, de forma a impedir sua penetração no solo e seu carreamento por chuvas.

Entretanto, é importante observar que, até os dias atuais, essas medidas ainda não foram tomadas. Partindo dessa observação, todas as soluções aqui sugeridas levaram em consideração que a fonte de contaminação permaneceu ativa ao longo dos anos de simulação do comportamento da pluma.

Dentre os processos de remediação estudados, uma das soluções que pode ser aplicada e que foi simulada com o auxílio do MODFLOW é a construção de uma **Barreira Subterrânea Impermeável** (barreira de lama) que impede a passagem da água e conseqüentemente do contaminante, isolando-o próximo à fonte de contaminação. As Figuras 13 e 14 mostram a redução na pluma do contaminante após a colocação da barreira de lama.

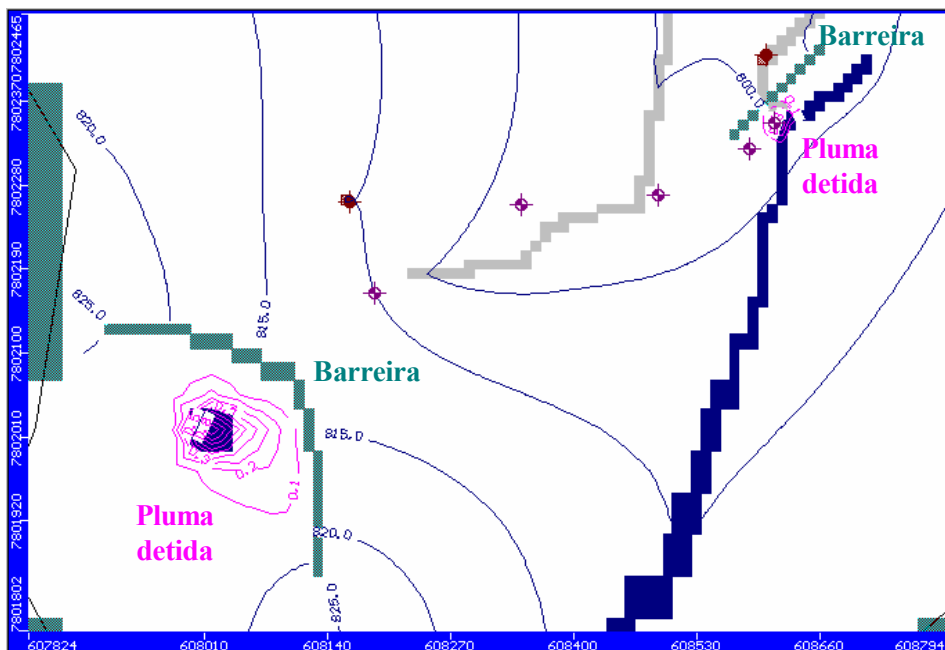


Figura 13. Contenção das plumas de contaminante após a colocação das barreiras impermeáveis. Tempo de simulação de 20 anos.

Uma desvantagem da adoção desse método é que ao se implantar a barreira, observa-se um aumento no nível do lençol freático a montante da instalação e uma pequena redução do nível freático imediatamente a jusante. Isso pode ser observado na Figura 14 a seguir:

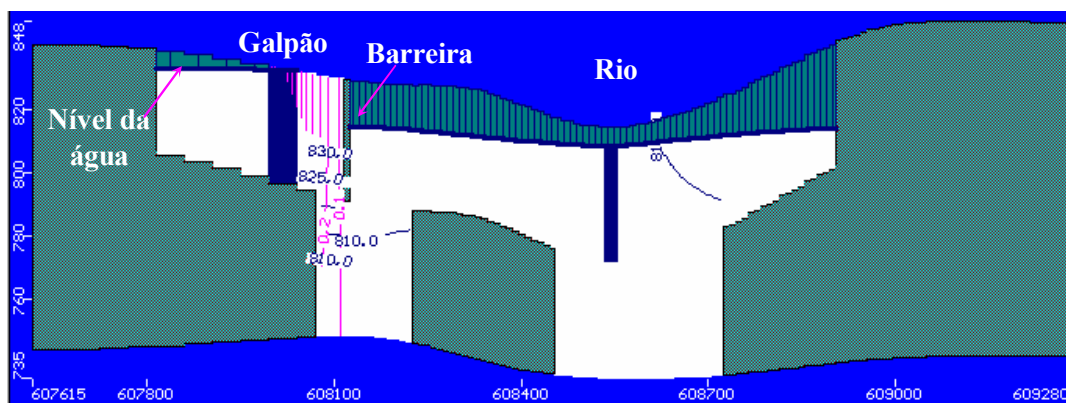


Figura 14 - Corte vertical na região do galpão de fósforo (em azul, à esquerda), mostrando a contenção da pluma pela barreira. Tempo de simulação de 20 anos.

Uma outra sugestão para a remediação do aquífero é a instalação de uma **Barreira Reativa Permeável** (Baker et al., 1998). A barreira permeável permite que o fluxo de água subterrânea permaneça inalterado, enquanto que os compostos químicos presentes na barreira adsorvem ou precipitam o fosfato, impedindo o avanço da pluma de contaminantes (Figura 15).

A barreira é feita através da escavação de uma vala que é preenchida com material reativo. Para o caso em estudo (contaminação por fosfato), o material reativo na barreira é uma mistura de óxido de ferro, óxido de cálcio e pedra calcária. Isso promove a adsorção e precipitação do fosfato.

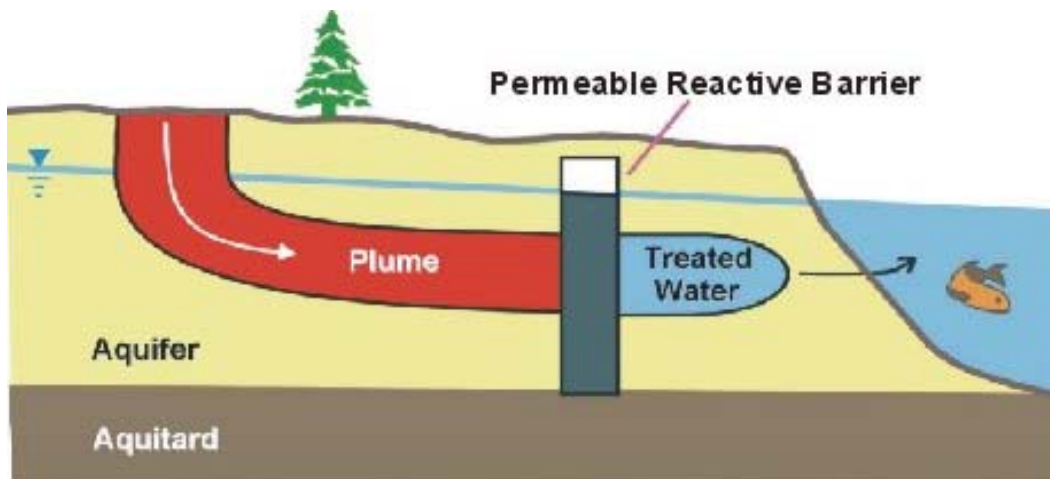


Figura 15 - Esquema do funcionamento de uma barreira reativa permeável.

Uma sugestão complementar para a remediação seria a aplicação da **Fitorremediação** (Miller, 1996). O processo se caracteriza pela plantação de árvores com raízes profundas, que fazem a extração e acumulação do contaminante em tecidos das plantas. Deve-se fazer posteriormente a remoção dessa massa verde, pois o fosfato permanece agregado à planta. Por ser um nutriente, o fosfato seria facilmente absorvido, não havendo a formação de subprodutos indesejáveis. Uma visão simplificada do funcionamento da fitorremediação pode ser visto na Figura 16:

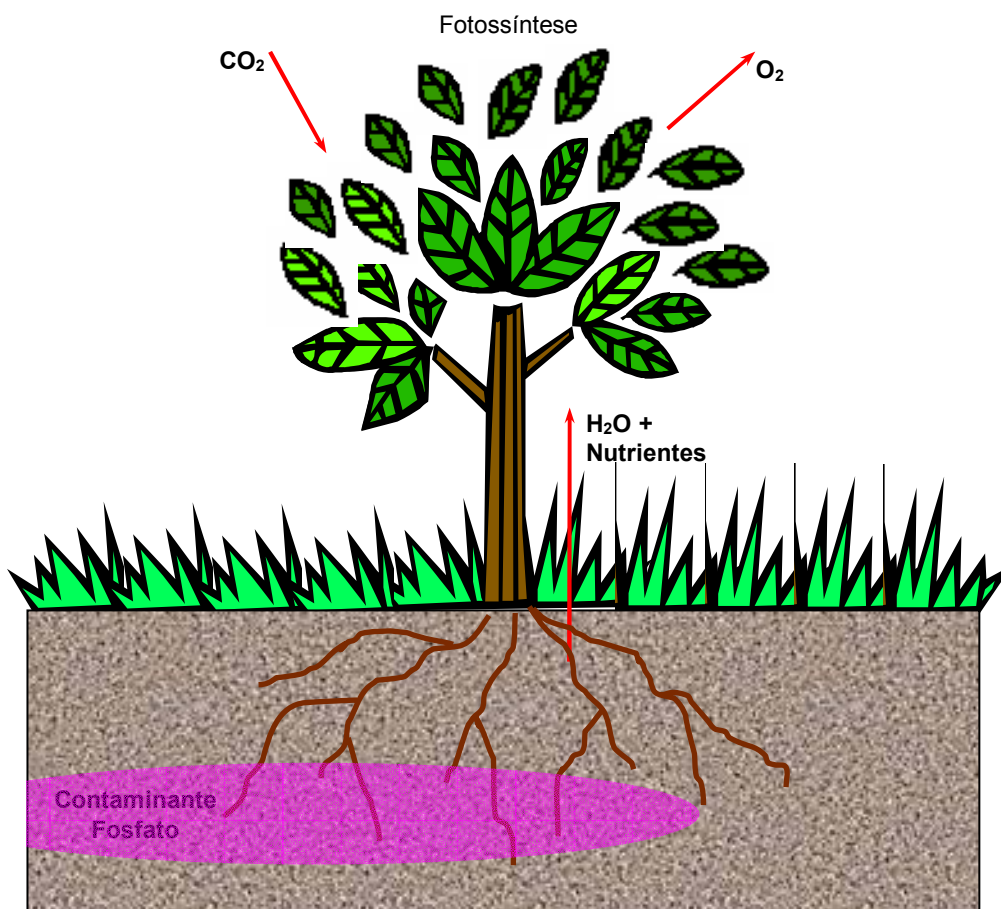


Figura 16 - Esquema do funcionamento da fitorremediação

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e do estudo desenvolvido ao longo do trabalho, pode-se dizer que foi obtido êxito na modelagem do fluxo do aquífero, uma vez que os indicadores de calibração do programa indicaram a fidelidade da simulação (coeficiente de correlação igual a 0,966 e discrepância no balanço de massa igual a zero) e, conforme foi previsto, detectou-se que as fontes poluidoras dos poços são, de fato, o Galpão de Fósforo e o Córrego Engenho Nogueira, o que pôde ser visualizado na simulação da pluma de fosfato, obtida pelo MODFLOW.

Conforme está exposto no trabalho, foram propostas algumas soluções viáveis para a remediação do aquífero, baseadas nas informações disponíveis e nos resultados obtidos. Os processos sugeridos foram a barreira reativa permeável, a barreira de lama e a fitorremediação.

Uma simulação do funcionamento da barreira de lama foi realizada no MODFLOW, e esta mostrou ser eficiente na contenção da pluma de contaminante, porém não detém a parte que esteja então à jusante do local de implantação. A barreira reativa permeável foi proposta por ser uma tecnologia moderna e de boa aplicabilidade para o caso em estudo. A fitorremediação, apesar de ser ecologicamente mais recomendável por não causar impactos ambientais, é uma técnica lenta e limitada, devendo portanto, ser utilizada como complementação às demais, caso se pretenda obter resultados a curto prazo. Ela pode auxiliar também na remoção do fosfato a jusante da barreira de lama, uma vez que essa apenas permite a contenção do contaminante próximo à fonte.

Vale salientar que uma indicação mais precisa na determinação do processo mais apropriado para o caso exigiria a realização de estudos complementares, como por exemplo, viabilidade econômica, condições de execução, ocupação e uso do solo etc.

AGRADECIMENTOS

Ao CDTN, por ter nos disponibilizado todos os dados e informações necessárias para a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABASINFORMA: *Boletim informativo da associação brasileira de águas subterrâneas* – Nº 124
Março/2002.
- ABASINFORMA: *Boletim informativo da associação brasileira de águas subterrâneas* – Nº 125
Abril/2002.
- BAKER, M. J., BLOWES, D. W. & PTACEK, C. J. *Laboratory development of permeable reactive mixtures for the removal of phosphorous from onsite wastewater disposal systems.*
Environmental Science and Technology, vol. 32, nº 15, 1998.
- CARVALHO FILHO, C. A., BRANCO, O. E. A., LOUREIRO, C. O. Aspectos geológicos e hidrogeológicos da área do PROHBEN - Projeto hidrogeológico da bacia do Engenho Nogueira, IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Salvador, 1996.
- CARVALHO FILHO, C. A. de. *Caracterização hidrogeológica da bacia hidrográfica do Campus da UFMG, Belo Horizonte/ Minas Gerais.* Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1997, 162p.
- COTA, S. 2001. *Bacia do Ribeirão Engenho Nogueira, Belo Horizonte, MG.* Estudo de Caso. Não Publicado.
- FEITOSA, F. A.; MANOEL FILHO, J. (coords.). *Hidrogeologia – conceitos e aplicações.*
Fortaleza: CPRM, 1997.
- MCDONALD, M.G. e HARBAUGH, A.W., A modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model, Techniques of Water-Resources Investigations of the United State Geological Survey, Book6, Chapter A1, USGS Open-File Report 83-875, 1988.
- MILLER, R. R. Phytoremediation. GWRTAC – Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 1996. Disponível online em www.gwrtac.org.
- Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14^o, 2001, Aracaju. *Modelagem matemática do transporte de contaminantes na Bacia Hidrogeológica Experimental do Córrego do Engenho Nogueira – Belo Horizonte / MG.* Anais... Aracaju: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.
- TODD, D. K. *Groundwater hydrology.* 2^a ed., New York: John Wiley & Sons, 1980.
- ZHENG, C. *MT3D – A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems.* U.S. Environmental Protection Agency, Robert Kerr Environmental Laboratory, 1990.