

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

EDUARDO HENRIQUE SEHNEM BERNARDO DA SILVA

Definição e otimização de barreira hidráulica com uso de modelos numéricos

São Paulo

2022

Definição e otimização de barreira hidráulica com uso de modelos numéricos

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Luiz Carlos Kauffman
Marasco Ferrari

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Sehnm, Eduardo Henrique Bernardo da Silva
Definição e otimização de barreira hidráulica com uso de modelos
numéricos / E. H. B. S. Sehnm -- São Paulo, 2022.
35 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas,
Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia
Química.

1.Modelos matemáticos 2.Contaminação de águas subterrâneas 3.Áreas
contaminadas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os professores do curso, pelas excelentes aulas e trocas de conhecimento, mas especialmente ao meu orientador, professor Luiz Ferrari. Além de um excelente professor e técnico experiente, se mostrou muito compreensivo e esteve sempre disponível para auxiliar quando os percalços surgiram, sejam as dificuldades operacionais deste modelador inexperiente, sejam as perdas e obstáculos inevitáveis à vida de qualquer ser humano.

Agradeço à Aquaveo que disponibilizou a licença do software GMS, permitindo a execução deste trabalho.

Um agradecimento especial aos meus valiosos amigos, que tornam a vida e suas tarefas sempre mais fáceis. Especialmente agradeço a Renata Schibelbein, presente em todos os momentos, mesmo quando não havia possibilidade.

Por fim, mas nunca menos importante, agradeço a minha mãe que sempre esteve ao meu lado, apoiando minhas decisões e desenvolvimento, permitindo que eu chegasse até aqui e a tantas outras conquistas que compartilhamos.

“Viver é partir, voltar e repartir.

Partir,

voltar e repartir...”

Felipe Vassão / Leandro Roque / Thiago Jamelão

RESUMO

Sehnem, Eduardo Henrique Bernardo da Silva. Título. 2022. 35 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Neste trabalho foi realizada a modelagem numérica de uma área com objetivo de definir uma barreira hidráulica, eficaz e eficiente, capaz de conter toda a carga de contaminantes provenientes da área fonte e lixiviada para o aquífero, antes que esta atinja algum dos bens a proteger. O local de estudo é definido por uma área de uso agrícola relativamente próxima à área de nascente de um rio utilizado para abastecimento público, assim como de um poço tubular também utilizado para captação e consumo humano. Do ponto de vista geológico, apesar do contexto sedimentar, a área apresenta relativa complexidade, pois as camadas aquíferas são definidas por lentes arcoseanas de grande condutividade (K) inseridas em camadas argilosas (aquitardes), da Fm. Guabirota. Com uso do software GMS e com suas ferramentas MODFLOW e MODPATH foi possível modelar a área e, posteriormente, realizar aplicação de partículas nas áreas fontes e simular suas trajetórias no interior do aquífero, em cenários de estiagem e períodos chuvosos. A concepção das barreiras hidráulicas foi realizada pelo método de tentativa. Foram testadas diversas opções, sempre buscando a alternativa mais eficiente e com menor custo de implantação e operação. A barreira ideal para o cenário modelado consiste em quatro poços, retirando um volume total de 212,50 m³/d, capaz de capturar todas as partículas de contaminantes, sob qualquer regime de recarga (estação chuvosa e estiagem). Adicionalmente, a modelagem e a utilização de partículas demonstraram que, de fato, o rio é o receptor da carga de contaminantes, enquanto o poço de captação não é atingido por qualquer partícula, em nenhum contexto testado.

Palavras-chave: Modelos matemáticos; Contaminação de águas subterrâneas; Áreas contaminadas.

ABSTRACT

Sehnem, Eduardo Henrique Bernardo da Silva. Título. 2022. 35 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

In this work, numerical modeling of an area was carried out in order to define a hydraulic barrier, effective and efficient, capable of containing the entire load of contaminants from the source area and leached into the aquifer, before it reaches any of the goods to be protected. The site is defined by an area of agricultural use relatively close to the source zone of a river used for public supply and also of a tubular well used for capture and human consumption. From a geological point of view, despite the sedimentary context, the area is relatively complex, as the aquifer layers are defined by high conductivity (K) archosean lenses inserted into clayey layers (aquitards). Using the GMS software with the MODFLOW and MODPAT tools, it was possible to model the area and, later, apply particles in the source areas and simulate their trajectories inside the aquifer. The design of the hydraulic barriers was carried out by the trial method, with several options being tested, always looking for the most efficient alternative and with the lowest cost of implantation and operation. The ideal barrier for the modeled scenario consists of four wells, removing a total volume of 212.50 m³/d, capable of capturing all contaminant particles, under any recharge regime (rainy season and drought). Additionally, the modeling and use of particles showed that, in fact, the river is the recipient of the load of contaminants, while the catchment well is not hit by any particle, in any tested context.

Keywords: Mathematical models; Groundwater contamination; Contaminated sites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Layout esquematizado da área de estudo e entorno	17
Figura 2 Seções transversais interpretadas – visão em planta e oblíqua	21
Figura 3 Exemplo de seção longitudinal- aproximadamente SE/NW	21
Figura 4 Exemplo de seção transversal- aproximadamente NE/SW	22
Figura 5 Visão em perspectiva do volume gerado pela modelagem	22
Figura 6 Grid do modelo de fluxo	23
Figura 7 parâmetros do solver MODFLOW PCG2	24
Figura 8 visão em planta do modelo de fluxo durante a estação chuvosa (layer 3).	25
Figura 9 visão em planta do modelo de fluxo durante a estiagem (layer 3)	25
Figura 10 Localização dos poços de bombeamento (intervenção)	27
Figura 11 Migração de partículas no aquífero - estação chuvosa	29
Figura 12 Migração de partículas no aquífero - estação seca	31

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Parâmetros hidráulicos do Aquífero Guabirota	16
Quadro 2 Características dos poços de monitoramento.....	18
Quadro 3 Precipitação mensal na área de estudo	19
Quadro 4 Características dos poços de bombeamento	26

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1.	MODELAGEM NUMÉRICA.....	11
3.2.	CAPTURA DE PARTÍCULAS	13
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	14
4.1.	GEOLOGIA	14
4.1.1.	Formação Guabirota.....	15
4.2.	HIDROGEOLOGIA.....	15
4.3.	GEOMORFOLOGIA	16
4.4.	ÁREAS FONTE de contaminação	16
4.5.	BENS A PROTEGER	17
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1.	AQUISIÇÃO DE DADOS	18
5.1.1.	Primários	18
5.1.2.	Processados	19
5.2.	MODELO CONCEITUAL.....	19
5.2.1.	Condições de contorno	20
5.2.2.	Criação de sólidos	20
5.3.	MODELO DE FLUXO	22
5.4.	CAPTURA DE PARTÍCULAS	26
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
6.1.	PERÍODO CHUVOSO	27
6.2.	ESTIAGEM.....	30
6.3.	INCERTEZAS.....	30
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32

8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
----	----------------------------------	----

1. INTRODUÇÃO

O processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), definido na Resolução CONAMA 420/09, é, por natureza, um processo de decisões em cadeia, onde, com base nas informações levantadas em estudos anteriores, o gestor da área deve tomar medidas que visem a proteção do meio ambiente, da saúde humana, entre outros. Após uma área ser considerada Contaminada Sob Intervenção (ACI), ou seja, ter risco confirmado diante da realização de uma Análise de risco à saúde humana, diversas medidas podem ser empregadas visando eliminar os riscos e defender a integridade dos bens a proteger. A escolha da técnica utilizada, dentre cada uma das abordagens disponíveis, deveria levar em consideração três pontos principais:

- I. Viabilidade da ação no contexto da área;
- II. A eficácia da ação, ou seja, caso a medida seja adotada, se ela atingirá o objetivo da intervenção (eliminar riscos para um ou mais bens a proteger); e
- III. A eficiência da ação, garantindo a melhor relação entre custos de implantação, tempo de resposta e demais empenhos necessários à sua realização.

Entretanto, nem sempre essa abordagem é aplicada. Comumente os métodos empregados são aqueles dominados pela empresa de consultoria (responsável técnico) ou aqueles que apresentam menor custo à primeira vista. Todavia, ao longo do tempo e evolução de uma área contaminada, essas escolhas, embasadas de maneira equivocada, acabam se mostrando, quase sempre, mais onerosas em comparação com a aplicação de técnicas mais específicas e adequadas, seja pelo tempo necessário ou pelo valor monetário investido.

Outro fator importante para o êxito da intervenção é o correto *design* da intervenção. Muitas vezes uma técnica com grande potencial no contexto do *site* acaba não apresentando resultados satisfatórios por falha no projeto ou execução. Há ainda casos onde os custos se tornam demasiadamente elevados por mal dimensionamento das estruturas, produtos e equipamentos.

A escolha de técnicas pertinentes ao contexto específico da área, entenda-se, viáveis, eficazes e eficientes, invariavelmente passa por um processo de modelagem da área e das alternativas estudadas. Nesta monografia a modelagem será utilizada para maximizar os resultados de uma possível intervenção em um *site* contaminado, utilizando uma barreira hidráulica. Esse é apenas um dos métodos possíveis de intervenção no contexto, contudo, os resultados obtidos permitem que o gestor da área tenha total conhecimento das áreas impactadas,

custos envolvidos e resultados esperados, podendo assim comparar o método das barreiras com outros propostos e tomar uma escolha racional e acertada.

Neste estudo em específico foram utilizados dados de uma área real, descaracterizada por questões éticas. A área contaminada apresenta riscos para receptores naturais e antrópicos, representados por um corpo de água superficial e um poço de captação de água subterrânea, ambos utilizados para abastecimento.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral:

Definir uma barreira hidráulica para a área de estudo de modo a garantir que partículas de contaminantes não atinjam os bens a proteger em nenhum período do ano.

Objetivos específicos:

- I. Confecção do modelo da área de estudo;
- II. Criação de alternativas de barreiras hidráulicas
- III. Otimização das barreiras considerando a diminuição dos custos de implantação (perfuração e instalação) e operação (bombeamento e tratamento).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MODELAGEM NUMÉRICA

Modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para representar a realidade de maneira simplificada (WANG; ANDERSON, 1982). Até o início da década de 1970 eram utilizados modelos físicos, desenvolvidos em laboratório, os quais foram gradualmente substituídos por modelos numéricos que se desenvolvem até hoje (BEAR; VERRUIJT, 1987). A utilização de modelos matemáticos permite realizar previsões após uma determinada ação proposta, sendo considerada por diversos autores, entre eles Anderson e Woessner (1992), como o melhor método para tal objetivo. Outros autores, compreendendo tamanho potencial, vão além e definem a modelagem de águas subterrâneas como uma ferramenta de gestão para tomada de decisão, pois garantem informações sobre o sistema das águas subterrâneas e impactos futuros de decisões da gestão do *site* (CHUNG; KIM; KONG, 2011). Ainda segundo esses autores, um modelo pode fornecer diversas informações tais quais os níveis da água, direção de fluxo e pluma de contaminantes, além da distribuição futura das concentrações de contaminantes.

Apesar de muito vantajosa, a utilização da modelagem matemática exige mais informações do meio observado para atingir seu objetivo de representar de maneira fiel o comportamento das águas subterrâneas, em comparação com técnicas mais simples (BERENICE, 2010). E mesmo de posse de tais informações, converter o conhecimento de campo para as equações do modelo corresponde a um dos grandes desafios do processo (BERENICE, 2010).

O modelo MODFLOW foi desenvolvido pelo serviço geológico do Estados Unidos da América e consiste em um sistema tridimensional de diferenças finitas (MCDONALD E HARBAUGH, 1988). Segundo Cleary (1989) o método de diferenças finitas é caracterizado pela representação discretizada no ponto, ou seja, os nós da malha definem os valores de carga hidráulica para todo o volume ao seu redor. No MODFLOW o *Grid* (malha) é composto por linhas, colunas e *layers*, sendo o nó colocado no centro de cada célula.

A base de funcionamento do MODFLOW decorre da aplicação, em cada uma das células do *Grid*, dos princípios de conservação de massa e da Lei de Darcy, unidos na equação descrita por Fetter (1994), apresentada abaixo:

$$\frac{\delta^2 q}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 q}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 q}{\delta z^2} = -R(x, y, t) + Ss \frac{h}{dt}$$

Onde:

Ss: armazenamento específico [1/L];

h: Carga hidráulica [L];

t: tempo [T];

R: fluxo volumétrico por unidade de volume [L³/TL³];

$\frac{\delta^2 q}{\delta x^2}$: Condutividade hidráulica ao longo dos eixos x, y e z [L/T].

Adicionalmente a essa base que define o fluxo entre as células (resolve o modelo), existem módulos (ou pacotes) específicos que determinam, de maneira independente, valores para parâmetros que caracterizam o sistema hidrogeológico definido no modelo conceitual, tais quais: recarga, drenagens, rios, poços de captação e injeção, evapotranspiração. Não é o

objetivo deste trabalho esmiuçar o funcionamento de cada um destes pacotes, e sim aplicá-los, de modo que o tema não será aprofundado.

A concepção do modelo conceitual é etapa crucial do processo de modelagem. Segundo Walton (1992) o Modelo conceitual deve se focar em compreender o sistema hidrogeológico, caracterizando as unidades hidroestratigráficas, assim como suas características hidráulicas. Isso, aliado às condições de contorno, será capaz de definir o fluxo das águas subterrâneas.

Por fim, as condições de contorno, que delimitam a área do modelo e as fronteiras hidráulicas ou mesmo físicas, por isso são os locais adequados para inserir informações como cargas hidráulicas, condutividades, condutâncias, vazões de poços e rios, etc. Como são bastante numerosas as possibilidades, diversas condições de contorno podem ser adotadas, no entanto Anderson e Woessner (1992) recomendam que sempre sejam consideradas no modelo condições que representem fronteiras hidráulicas naturais. Ou seja, condições de contorno como rios e divisores de água devem ser adicionadas aos elementos superficiais, assim como contatos geológicos devem ser considerados em subsuperfície. Diversos autores discorrem sobre a classificação das condições de contorno, sendo utilizada aqui divisão em três classes apresentada por Franke, Reilly e Bennet (1987) e Anderson e Wossner (1992), entre vários outros:

- Tipo I - Dirichlet: Condição de carga conhecida, ou seja, a carga é especificada no contorno;
- Tipo II – Neumann: Condição de fluxo conhecido em algum ponto do contorno, podendo inclusive ser definida por um não fluxo (fluxo igual a 0);
- Tipo III – Cauchy: Condição em que a relação entre fluxo e carga é conhecida, permitindo o cálculo do fluxo a partir das cargas definidas e calculadas.

3.2. CAPTURA DE PARTÍCULAS

Uma maneira simplificada de projetar ou rastrear a origem de contaminantes em um aquífero é a utilização de modelos de caminhamento de partículas. Iritani (1999) descreve essa técnica como o acompanhamento da trajetória de pequenas partículas colocadas no aquífero, considerando apenas a velocidade da água e o processo advectivo. Ou seja, os contaminantes não estariam sujeitos a processos como a adsorção e decaimento, como ocorre na realidade. Apesar de se tratar de uma técnica simplificada, a ferramenta se mostra bastante efetiva para determinar as trajetórias das partículas, permitindo determinar, por exemplo, avanços e

espalhamentos de plumas. Outra função interessante é a possibilidade de regredir as partículas, ou seja, simular sua posição em um momento anterior ao observado, rastreando, assim, sua origem potencial. Por essas duas funções Iritani (1999) destaca que o caminhamento de partículas pode ser usado tanto para avaliação de riscos potenciais com o avanço da pluma (previsão de bens a proteger potencialmente impactados), como para instalação e otimização de barreiras hidráulicas com poços de extração.

A aplicação dessa técnica se dá com uso de softwares como o MODPATH (POLLOCK, 1989) que calcula, a partir de um modelo de fluxo pré-estabelecido, a velocidade da partícula em cada eixo cartesiano. Por essa característica, dependente de pré-processos, Iritani (1999) definiu tais aplicações como pós-processadores de fluxo de água subterrânea.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Para execução deste estudo foram utilizados dados de uma área existente, próxima à cidade de Curitiba, no estado do Paraná. Por questões de confidencialidade não poderão ser descritos maiores detalhes quanto a sua localização e demais informações que possam vir a identificar o local. Nesta área foi instalada uma rede de monitoramento de águas subterrâneas visando observar as interações entre o aquífero e o rio. No presente estudo foram utilizadas todas as informações referentes aos poços de monitoramento, incluindo localização, cota, profundidade total, perfil construtivo, descrição de solo e litotipos, além dos valores de carga hidráulica. Também foram observados aspectos do relevo, pluviometria, do escoamento superficial e captação de águas subterrâneas e superficiais.

4.1. GEOLOGIA

A área está inserida no contexto geológico regional da Bacia de Curitiba, abrangendo toda a cidade homônima e parte de sua região metropolitana, se estendendo por área total de aproximadamente 1.150 km² (RICCOMINI et al., 2004). Tal bacia foi originalmente descrita por Bigarella e Salamuni (1962), apresentando porções aflorantes e em subsuperfície. Diversos autores debatem a gênese dessa bacia, porém, o modelo proposto por Riccomini (1989) é o mais aceito, descrevendo a Bacia de Curitiba como parte da porção ocidental do Rift Continental do Sudeste Brasileiro (RCSB). Essa estrutura data do Cenozoico e consiste em uma depressão tectônica de aproximadamente 900 km de comprimento, alongada e paralela à linha de costa (PR-RJ) (RICCOMINI et al., 2004).

O embasamento da Bacia de Curitiba é composto por gnaisses, migmatitos, anfibolitos e xistos do Complexo Atuba, formado durante o pré-Cambriano (Bigarella; Salamuni, 1962), enquanto o preenchimento é dado pela Fm. Piraquara e pela Fm. Guabirota (RICCOMINI et al., 2004). A primeira é definida por Coimbra et al. (1996) como de ocorrência isolada, sempre em colinas, em contatos abruptos ou transicionais acima da Fm. Guabirota.

4.1.1. Formação Guabirota

A Formação Guabirota foi originalmente descrita por Carvalho (1934), sendo definida como argilitos esverdeados a avermelhados e cascalhos em intercalações. Posteriormente, Salamuni (1998) descreveu, também, a presença de níveis de calcrete. Bigarella e Salamuni (1962), descreveram os sedimentos como sendo argilosos e de coloração variando de cinza a avermelhados, conforme o grau de alteração, além de níveis arcoseanos e porções com presença de composição calcária. As camadas calcárias, descritas por Salamuni (1998) e por Bigarella e Salamuni (1962), podem ter origem sinsedimentar, por processos pedogenéticos (mais comum de modo geral) ou por processos freáticos, sendo este último modelo considerado o mais significativo, intenso e recente na visão de Cunha (2011), no caso da Formação Guabirota.

Quanto à espessura da Fm. Guabirota, há divergência na literatura, sendo considerada inferior a 40 metros por Carvalho (1934), variando de 60 a 80 metros, conforme Bigarella e Salamuni (1962) e variável de 1 a 80 metros na descrição de Salamuni (1998), com média de 50 metros.

Quanto aos sistemas deposicionais e a idade da Fm. Guabirota Salamuni (1998) afirma que esta teria se depositado em ambientes de leques aluvionares de sistema de drenagem estrelado, com extensas playas e planícies de inundação, durante o Oligoceno e o Mioceno. Adicionalmente, Bigarella e Salamuni (1962), consideram ainda um clima semi-árido, favorecendo a formação dos calcretes encontrados nesta formação (CUNHA, 2011).

4.2. HIDROGEOLOGIA

A área de estudo está situada sobre o Aquífero Guabirota, caracterizado como do tipo granular, ocorrendo em lentes arenosas arcoseanas da Formação Guabirota (MULLER *et al.*, 2008), podendo se apresentar livre ou semiconfinado, quando sobreposto pelas camadas argilosas (ROSA FILHO *et al.*, 2011). Segundo Rosa filho *et al.* as lentes são presentes em toda a bacia, apesar de descontínuas e são compostas por areias arcoseanas predominantemente grossas, de matriz areno- siltosa, por vezes argilosa e teor de feldspatos entre 20 e 40%.

As águas superficiais e advindas da superfície freática são responsáveis pela recarga do aquífero (ROSA FILHO; LISBOA; SCHOENAU, 1996, Apud MULLER *et al.*, 2008) e apresentam tempo de permanência relativamente baixo. Desta forma, o aquífero Guabirotuba apresenta águas pouco mineralizadas.

O aquífero Guabirotuba não é especialmente conhecido por altas vazões ou por sua capacidade de abastecimento, no entanto a companhia de saneamento paranaense (SANEPAR) opera alguns poços neste aquífero. São observadas vazões médias de 5 m³/h nos poços, havendo alguns registros atingindo até 80 m³/h (MULLER *et al.*, 2008). Outros parâmetros hidráulicos do Aquífero Guabirotuba são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 Parâmetros hidráulicos do Aquífero Guabirotuba

Porosidade efetiva	28%
Condutividade	3×10^{-3} m/s
Transmissividade	3×10^{-2} m ² /s
Coeficiente de armazenamento (livre)	$3,5 \times 10^{-1}$
Coeficiente de armazenamento (semi-confinado a confinado)	Ordem de grandeza de 10^{-3} a 10^{-5}

Fonte: Adaptado de Rosa Filho *et al.* (2011).

No geral as águas do Aquífero Guabirotuba são classificadas como bicarbonatadas cálcicas a magnesianas e sódicas, sendo comuns teores elevados de ferro e manganês no aquífero, geralmente associados a níveis de argilas orgânicas (ROSA FILHO *et al.*, 2011).

4.3. GEOMORFOLOGIA

A área delimitada neste estudo consiste em um vale, formado pelo início do curso de um rio, sendo o relevo da margem direita muito mais íngreme que do lado esquerdo. O relevo apresenta poucas intervenções, destacando-se a retificação de parte do canal do corpo de água superficial.

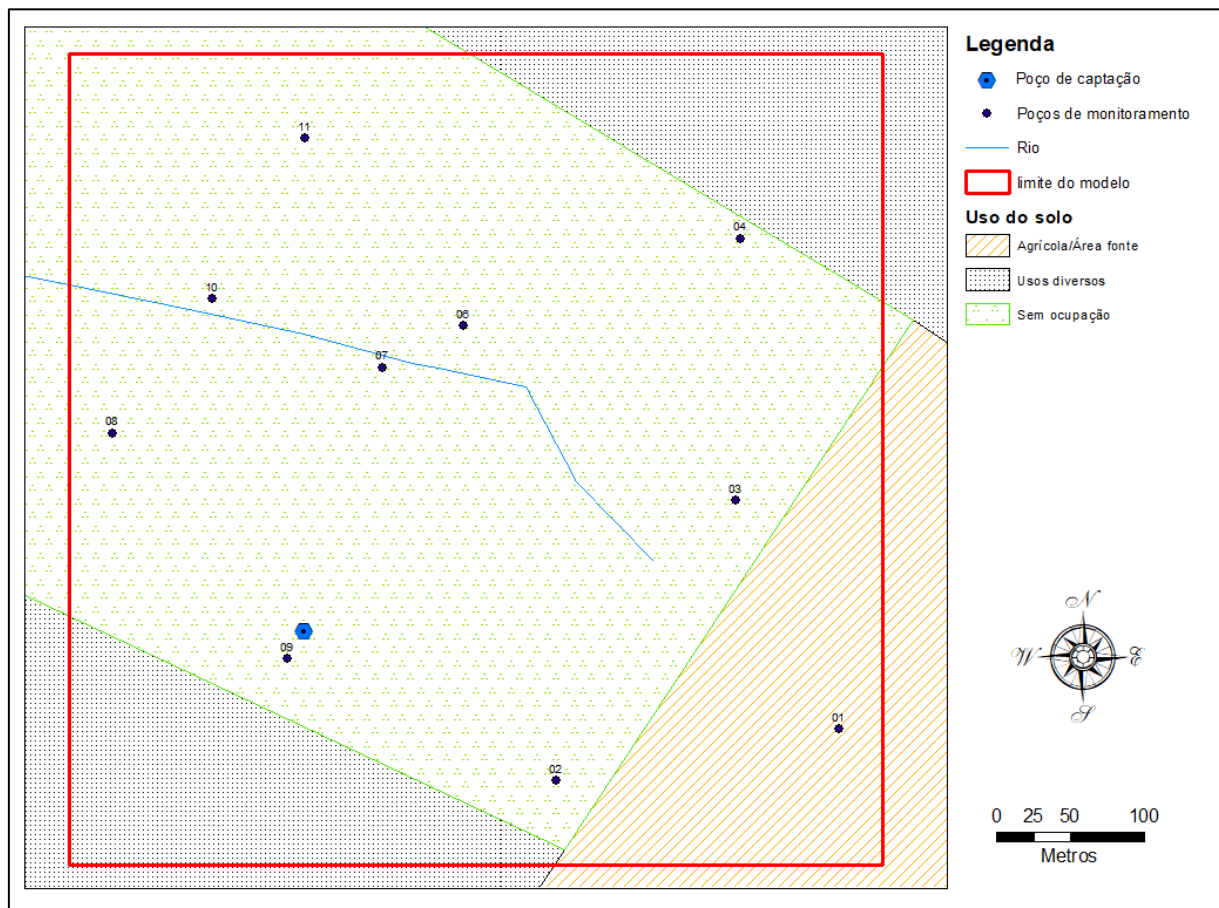
As porções adjacentes à área delimitada para o estudo apresentam alto grau de intervenção antrópica, sendo todas planificadas para atender aos usos atuais.

4.4. ÁREAS FONTE DE CONTAMINAÇÃO

Para este estudo foi considerada uma fonte difusa de contaminantes, localizada em porções no limite e à montante da área modelada. Essas regiões apresentam uso agrícola, sendo os

fertilizantes e os defensivos agrícolas a causa de preocupação. A Figura 1 apresenta uma visão em planta delimitando a área de estudo e áreas fonte.

Figura 1 Layout esquematizado da área de estudo e entorno



4.5. BENS A PROTEGER

As águas do rio que nasce na área de estudo são utilizadas para abastecimento público, estando a captação alguns quilômetros adiante. A chegada de contaminantes na nascente ou mesmo em outras porções do rio poderia inviabilizar a utilização dessa água, impactando diretamente o serviço público e a população.

Existe também na área um poço de captação, outorgado para consumo humano, que abastece algumas residências. O poço tem 65 metros de profundidade total, sendo 9 metros de seção filtrante, instalada com topo na cota 793 e base na cota 784, enquanto a superfície se encontra na cota 835,40. A outorga de uso foi concedida para operação de 20 horas por dia a uma vazão de 2m³/h.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. AQUISIÇÃO DE DADOS

5.1.1. Primários

Conforme mencionado anteriormente, o modelamento foi realizado em uma área onde já havia uma rede de poços de monitoramento instalada. Tal rede é composta por dez poços, com profundidades que variam de 30 a 55 metros, interceptando diversas camadas de solo e rocha. As camadas heterogêneas da Formação Guabirubata foram agrupadas e simplificadas para corresponderem a três grupos: a camada superior, essencialmente argilosa e ligada aos processos pedológicos locais; as lentes arcoseanas, descritas na literatura; e a camada essencialmente argilosa, também descrita na literatura.

Todos os poços pertencentes à rede foram monitorados por um ano após sua instalação, tendo seus níveis medidos ao menos uma vez por semana e com maior frequência em períodos chuvosos. Com base nesses dados foram estabelecidas as datas onde o conjunto de poços apresentou as cargas hidráulicas mais elevadas e mais baixas no decorrer do ciclo hidrogeológico. A sistematização das referidas informações de base é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 Características dos poços de monitoramento

Nome	Cota (m)	Profundidade (m)	cotas de topo e base dos filtros (m)	Carga hidráulica máxima (m)	Carga hidráulica mínima (m)
PM-01	869,43	50,00	826,43 - 824,43	845,93	833,15
PM-02	863,72	53,50	817,22 – 815,22	843,36	835,16
PM-03	825,89	30,00	802,89 – 800,89	822,96	819,83
PM-04	858,87	40,00	828,37 – 826,37	856,33	839,91
PM-06	797,39	31,00	773,39 – 771,39	797,02	791,60
PM-07	804,10	41,50	769,60 – 767,60	795,99	790,11
PM-08	792,19	34,50	767,39 – 765,39	792,08	786,78
PM-09	836,44	54,50	791,64 – 789,64	819,96	801,96
PM-10	795,36	31,00	769,36 – 767,36	791,59	786,86
PM-11	817,40	30,00	796,50 – 794,50	815,04	810,77

Para chegar aos valores de recarga e evapotranspiração foram utilizados dados medidos no decorrer de um ano em uma estação meteorológica próxima, definindo os valores de

precipitação máxima e mínima, além de caracterizar a estação chuvosa e de estiagem. O Quadro 3 apresenta sistematização dos dados de precipitação observados ao longo do ano.

Quadro 3 Precipitação mensal na área de estudo

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Precipitação(mm)	375	95	325	25	30	90	10	45	60	280	60	140

5.1.2. Processados

Para delimitação da porção superficial do modelo foi realizada uma interpolação da cota dos dez poços, de modo a gerar um grid com a topografia aproximada do terreno. O procedimento foi realizado utilizando-se o software Surfer v. 16 e o método IDW de interpolação, adicionado de uma suave anisotropia alinhada com a direção do vale.

Outro grid gerado para dar suporte ao modelo corresponde ao fluxo inicial das águas subterrâneas. Esse produto também foi gerado no software Surfer, todavia agora com a utilização de equações multiquádricas para interpolar os dados de cargas hidráulicas dos poços de monitoramento. Os valores de carga hidráulica utilizados foram aqueles representativos das cargas máximas, listados no Quadro 2.

5.2. MODELO CONCEITUAL

A tradução do modelo conceitual da área para o modelo numérico foi feita com uso do software GMS versão 10.0.1 da Aquaveo®, assim como todas as rotinas descritas a seguir envolvendo a modelagem. As *coverages* criadas e suas principais características são descritas abaixo:

- Carga estática: nesta *coverage* foram inseridos todos os dez poços de monitoramento e suas respectivas cargas hidráulicas;
- Poços de bombeamento: nesta *coverage* consta o poço de captação para abastecimento (bem a proteger) e todas as suas informações como vazão e profundidade da seção filtrante;
- Recarga: as condições de recarga foram estabelecidas a partir de percentuais dos valores de precipitação nas estações chuvosa e de estiagem. A área de estudo foi subdividida em três áreas, considerando aspectos de relevo, ocupação e presença de vegetação. As áreas mais planas e desocupadas, a montante da área, foram consideradas as principais áreas de recarga; enquanto as áreas no interior do vale

foram consideradas intermediárias; enquanto as áreas declivosas e com presença de vegetação intensa que efetivamente definem o vale foram consideradas como baixa recarga;

- EVPT: A evapotranspiração também foi considerada como percentual da taxa de precipitação, todavia não foram discretizadas áreas com valores distintos, sendo utilizado um valor único proveniente de uma média de valores de estudos em áreas semelhantes;
- Drenagem: o traçado da porção retificada do rio foi adquirido em campo e plotado. Foi estabelecida uma condutância de $30 \text{ m}^2/\text{d}/\text{m}$, com base em valores médios observados na literatura;

5.2.1. Condições de contorno

Para confecção do modelo foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Carga hidráulica especificada ou constante (tipo I);
- Fluxo especificado ou constante (tipo II)

Os valores de carga hidráulica nas bordas do modelo foram obtidos a partir do raster de fluxo inicial das águas subterrâneas, descrito no item 5.1.2.

Condições do aquífero raso: foi estabelecida uma subdivisão no interior do aquífero determinando a direção preferencial do fluxo subterrâneo. A camada superior, mais rasa, foi condicionada com fluxo horizontal igual a 0, sendo esta condição restrita ao layer 1;

Condições do aquífero profundo: nesta porção do aquífero, layers 2 a 10, não havia restrição de direção de fluxo.

5.2.2. Criação de sólidos

Os dez poços de monitoramento foram inseridos no modelo como *boreholes* e a partir dos seus litotipos, já devidamente reclassificados para as três categorias mencionadas anteriormente (camada superficial, lentes arcoseanas e camadas argilosas), foram geradas seções conectando todos os poços. A Figura 2 apresenta a disposição de todas as seções interpretadas, tanto na visão em planta quanto na oblíqua, permitindo uma perspectiva geral da disposição das camadas no terreno. Já nas figuras Figura 3 e Figura 4, são apresentados detalhes de duas seções aproximadamente perpendiculares e que cortam a área modelada em seu eixo maior (PM-02, PM-09 e PM-08 SE/NW) e em seu eixo menor (PM-02, PM-03 e PM-04 NE/SW).

A interpretação das seções, assim como a consequente geração dos sólidos foi baseada no modelo geológico da área, buscando similaridade com os aspectos descritos na literatura para a Formação Guabirotuba. Com base nessas interpretações foram estabelecidos nove horizontes, de 0 a 8, no modelo conceitual, nos quais se distribuíram os litotipos presentes nos poços. A partir das seções e da definição dos horizontes foram gerados os sólidos para preencher o volume modelado (Figura 5).

Figura 2 Seções transversais interpretadas – visão em planta e oblíqua

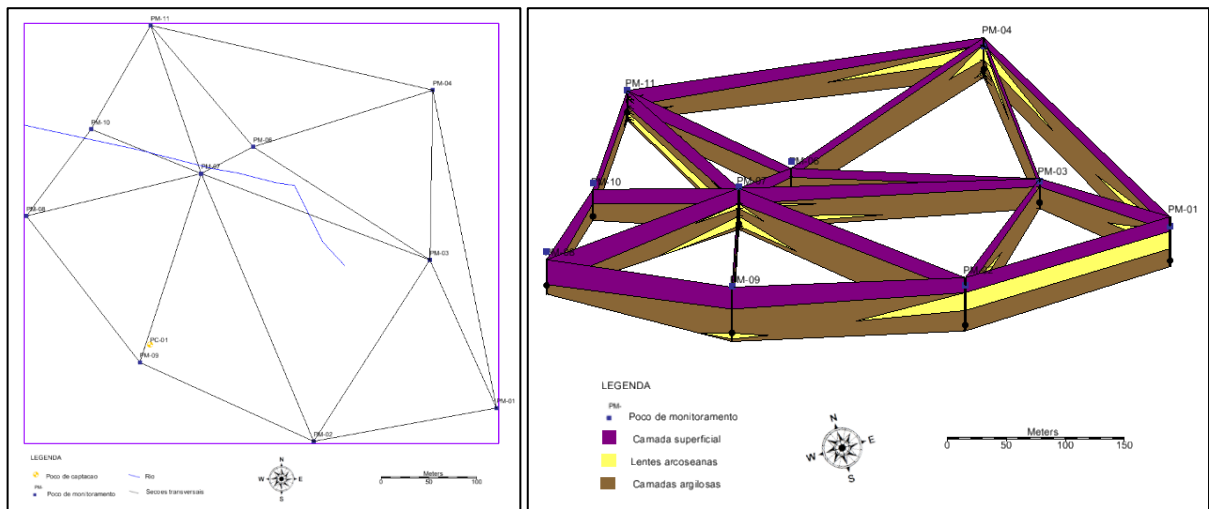
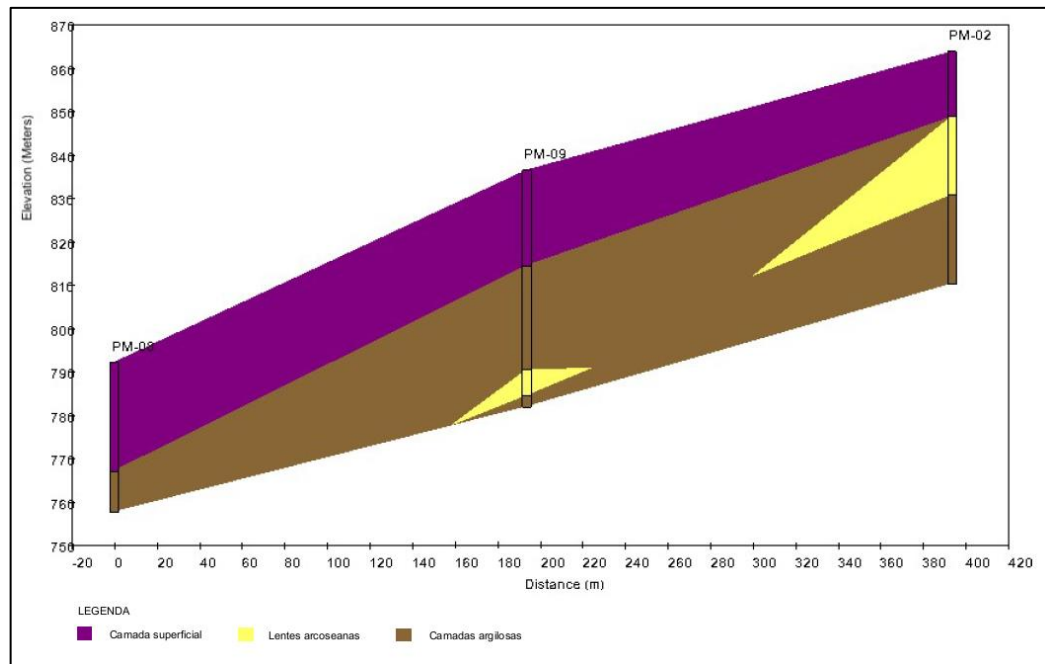
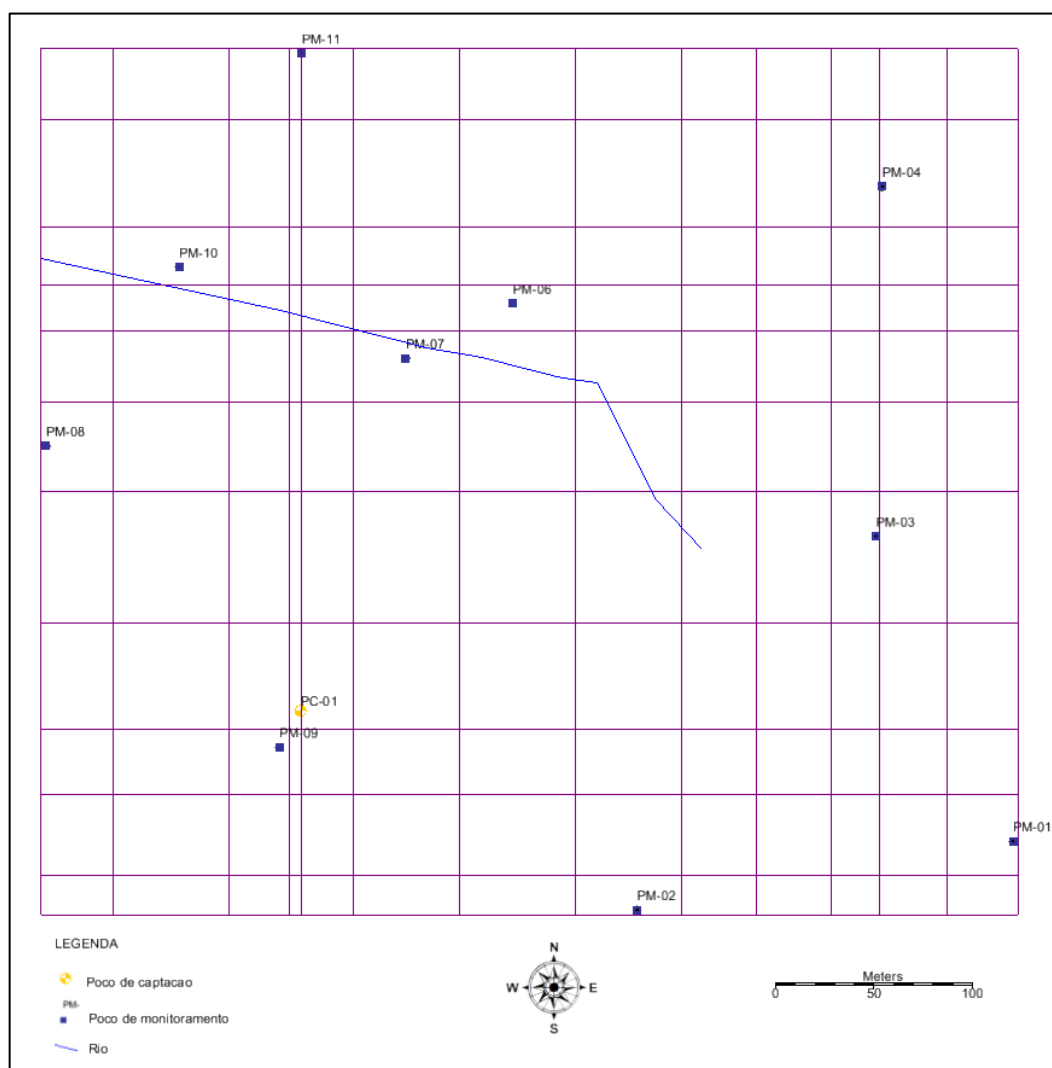


Figura 3 Exemplo de seção longitudinal- aproximadamente SE/NW



Este volume foi dividido em 1430 células, distribuídas em 11 linhas, 13 colunas e 10 *layers*, sendo as dimensões das células refinadas com base na localização do poço captação e dos poços de monitoramento presentes na área (Figura 7).

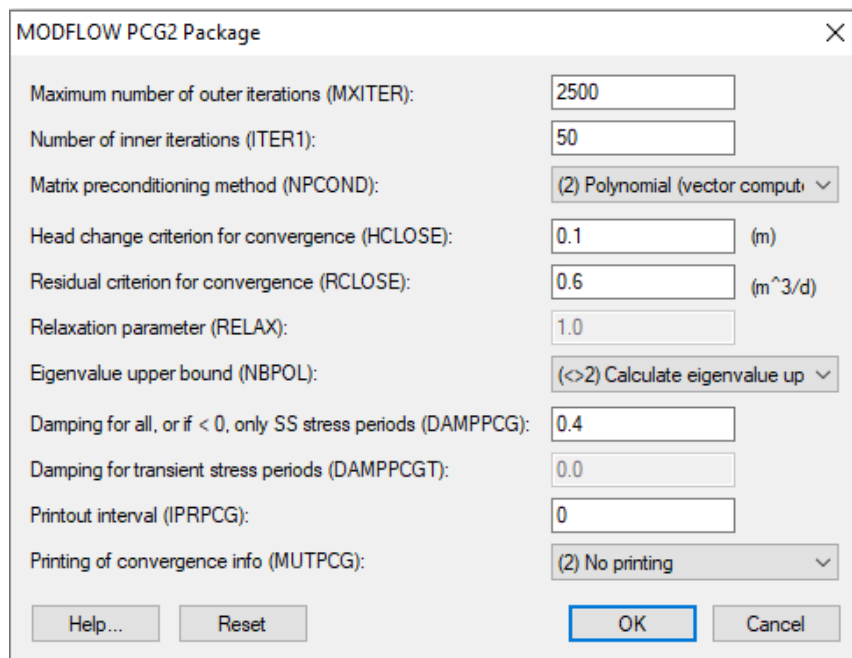
Figura 6 Grid do modelo de fluxo



Os valores de condutividade hidráulica horizontal foram estabelecidos para cada uma das três classes de materiais definidas no modelo. O valor referente as lentes arcoseanas foi retirado da literatura, onde foram realizados ensaios no material da formação, correspondendo a 3×10^{-3} m/s (ROSA FILHO *et al.*, 2011). Os valores para as outras duas camadas foram resultado de médias de valores obtidos em diferentes estudos com materiais de características semelhantes, resultando em $1,59 \times 10^{-5}$ m/s e $6,2 \times 10^{-7}$ m/s, para as camadas superficial e argilosa, respectivamente. Não há na literatura registros sobre testes de condutividade vertical na Formação Guabirotuba, desta forma optou-se por arbitrariamente considerar a condutividade vertical igual a um décimo da condutividade horizontal das camadas.

Para execução do MODFLOW foi utilizado o solver PCG2 do software GMS, com as configurações apresentadas na Figura 7.

Figura 7 parâmetros do solver MODFLOW PCG2



The image shows a dialog box titled "MODFLOW PCG2 Package" with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains several parameters for the solver, each with a label and a corresponding input field or dropdown menu. At the bottom, there are four buttons: "Help...", "Reset", "OK", and "Cancel".

Parameter	Value	Unit
Maximum number of outer iterations (MXITER):	2500	
Number of inner iterations (ITER1):	50	
Matrix preconditioning method (NPCOND):	(2) Polynomial (vector computi	
Head change criterion for convergence (HCLOSE):	0.1	(m)
Residual criterion for convergence (RCLOSE):	0.6	(m ³ /d)
Relaxation parameter (RELAX):	1.0	
Eigenvalue upper bound (NBPOL):	(<2) Calculate eigenvalue up	
Damping for all, or if < 0, only SS stress periods (DAMPPCG):	0.4	
Damping for transient stress periods (DAMPPCGT):	0.0	
Printout interval (IPRPGC):	0	
Printing of convergence info (MUTPCG):	(2) No printing	

A verificação da coerência e integridade do modelo foi feita observando-se o balanço de massa. Para que a modelagem seja considerada válida, neste quesito, é necessário que a diferença entre a quantidade de massa que entra e sai do volume modelado seja inferior a 1%. No caso deste estudo, o balanço de massa foi considerado excelente, apresentando diferença de 0,019% no modelo da estação chuvosa e 0,068% para a estação seca.

Os resultados da modelagem de fluxo na estação chuvosa e seca são apresentados nas figuras Figura 8 e Figura 9.

Figura 8visão em planta do modelo de fluxo durante a estação chuvosa (layer 3).

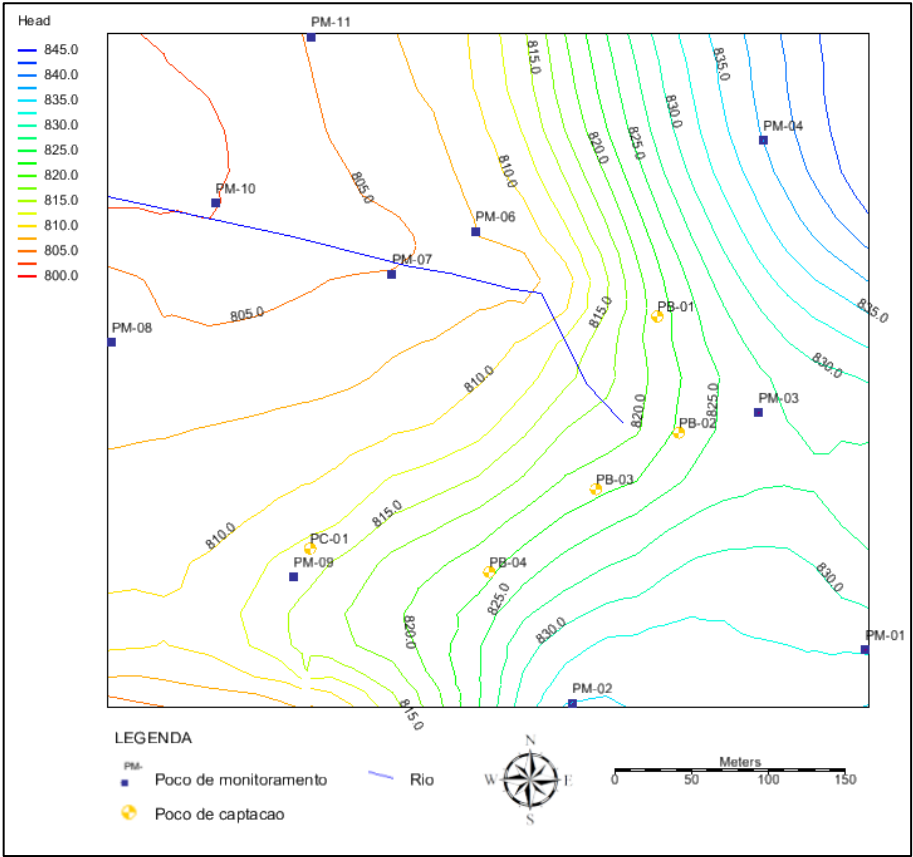
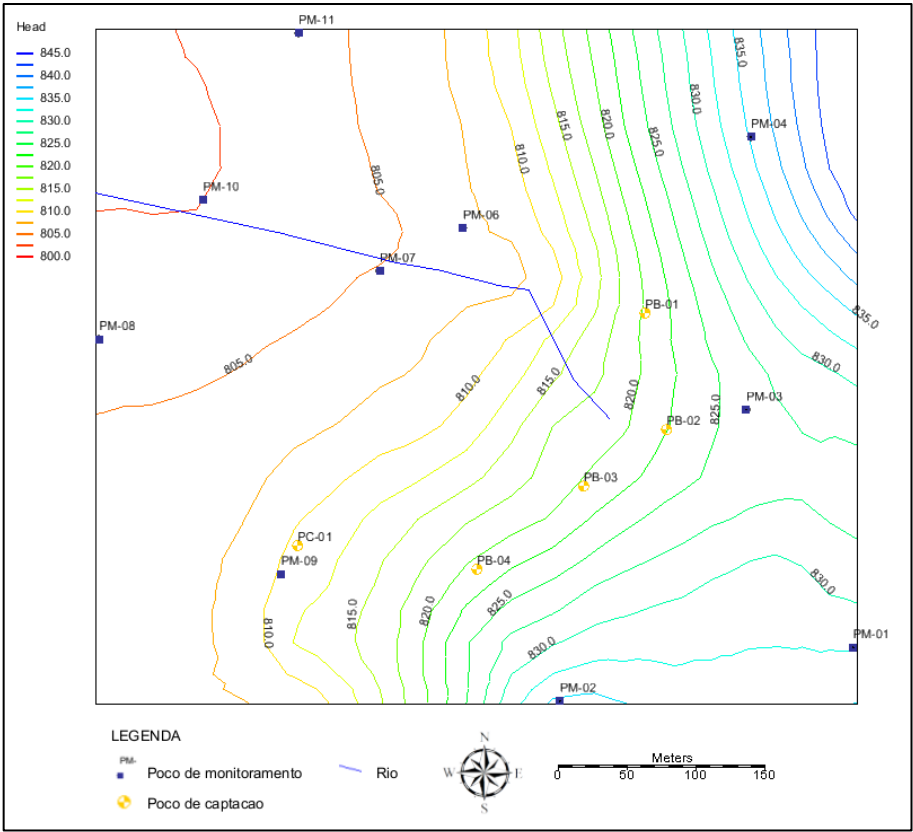


Figura 9visão em planta do modelo de fluxo durante a estiagem (layer 3).



5.4. CAPTURA DE PARTÍCULAS

Para testar a viabilidade e otimizar uma possível barreira hidráulica na área de estudo foi utilizada a aplicação MODPATH, ainda no software GMS. Essa técnica consiste em introduzir no modelo de fluxo algumas partículas em posições pré-estabelecidas e verificar sua trajetória até o ponto terminal ou determinar sua posição após um determinado período de tempo. Neste caso foram inseridas diversas partículas nas células próximas a área definida como área fonte (Figura 1), simulando a entrada de contaminantes na área modelada a partir da lixiviação destes compostos da superfície para o aquífero.

Cada uma das células recebeu um total de nove partículas distribuídas regularmente pela área e posicionadas no topo da superfície freática. Foram realizados testes do modelo de partículas para ambos os regimes de recarga, considerando os cenários: fluxo natural do aquífero; a ativação do poço de captação; e as propostas de instalação de barreiras hidráulicas.

A proposta de barreira foi considerada válida quando todas as partículas foram impedidas de atingir o poço de captação e o rio (bens a proteger) até o ponto terminal de seu deslocamento no volume modelado. Posteriormente a barreira foi otimizada em termos de custos de instalação e operação, a partir da redução ao número mínimo de poços, da revisão das profundidades máximas e extensão de filtros, além da redução das vazões diárias de cada poço.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

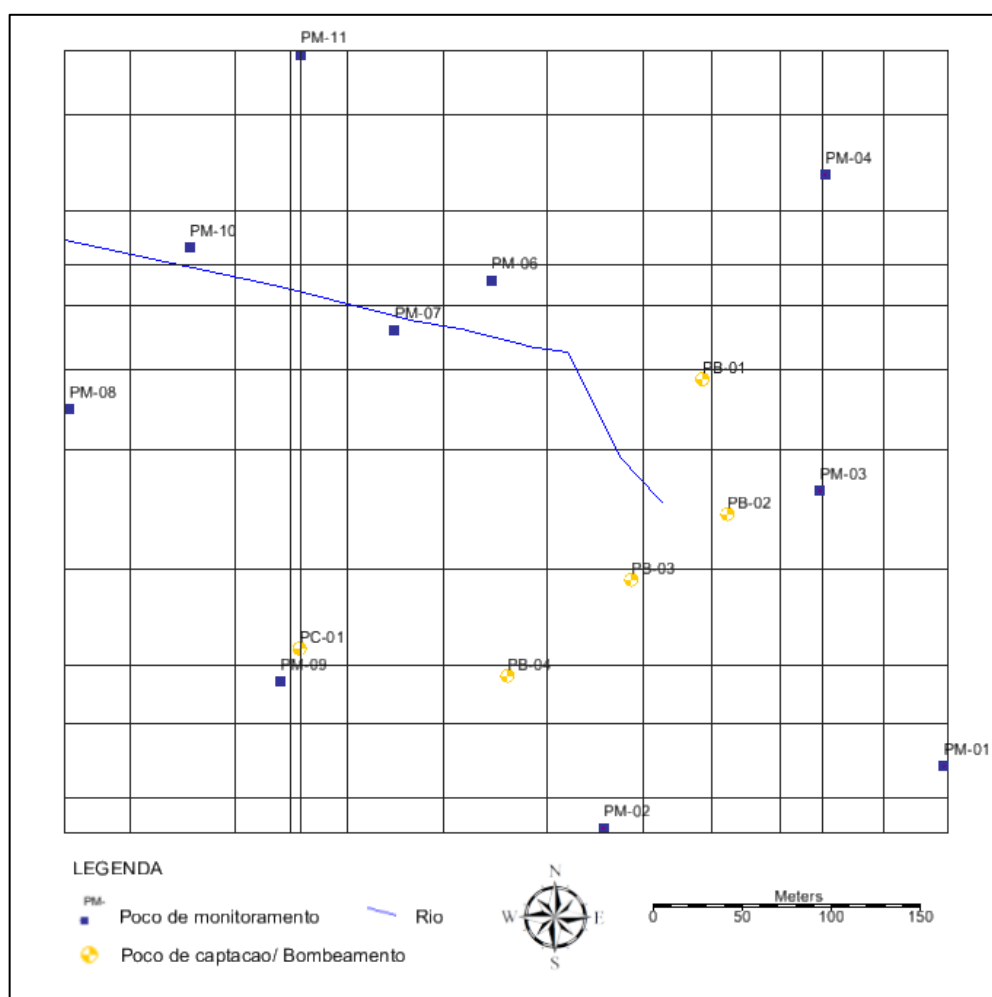
Após diversos testes e etapas de otimização, a melhor configuração de barreira observada consiste na instalação de quatro poços de bombeamento. Esse arranjo permite o funcionamento da barreira durante todo o ano e a captura de 100% das partículas inseridas no modelo. O detalhamento da localização, perfil construtivo e vazão dos poços é descrito no Quadro 4, enquanto a Figura 10 apresenta a localização dos poços na planta da área.

Quadro 4 Características dos poços de bombeamento

Poço	Coordenada (i,j)	Cota da boca(m)	Cotas da seção filtrante (m)	Vazão (m ³ /h)	Vazão (m ³ /d)
PB-01	6, 9	813,68	808 – 796	2,47	59,3
PB-02	7, 10	821,75	800 – 785	2,05	49,2
PB-03	8, 8	828,09	800 – 785	2,86	68,7
PB-04	9, 7	838,34	800 - 794	1,47	35,3

No total, o conjunto dos quatro poços operando teria uma vazão de 8,85 m³/h, 212,50 m³/d e 6.375,00 m³/mês. As vazões conferidas a todos os poços estão bastante aquém da média de produtividade descrita na literatura para a Formação Guabirotuba (5m³/h) e o conjunto não gera impactos significativos ao aquífero regional como será demonstrado pelos modelos a seguir.

Figura 10 Localização dos poços de bombeamento (intervenção)



6.1. PERÍODO CHUVOSO

No cenário atual, sem a presença da barreira hidráulica, no período de recarga elevada as partículas apresentaram trajetória curta, sendo que boa parte delas se direcionou ao corpo de água superficial já na nascente ou imediações. Todas as partículas atingiram o rio dentro da área modelada, indicando que, de fato, há razões para preocupação quanto à contaminação das águas superficiais a partir de lixiviados que migram pelo aquífero. A , durante a estação chuvosa, diminuindo a vazão total em 48m³/mês. Tal fato decorre dos diferentes materiais pelos quais a água transita, conforme a mudança do nível freático e das características condutivas dos mesmos.

Figura 11 apresenta a migração das partículas no aquífero sem a ativação dos poços de bombeamento e captação, durante a estação chuvosa, diminuindo a vazão total em 48m³/mês.

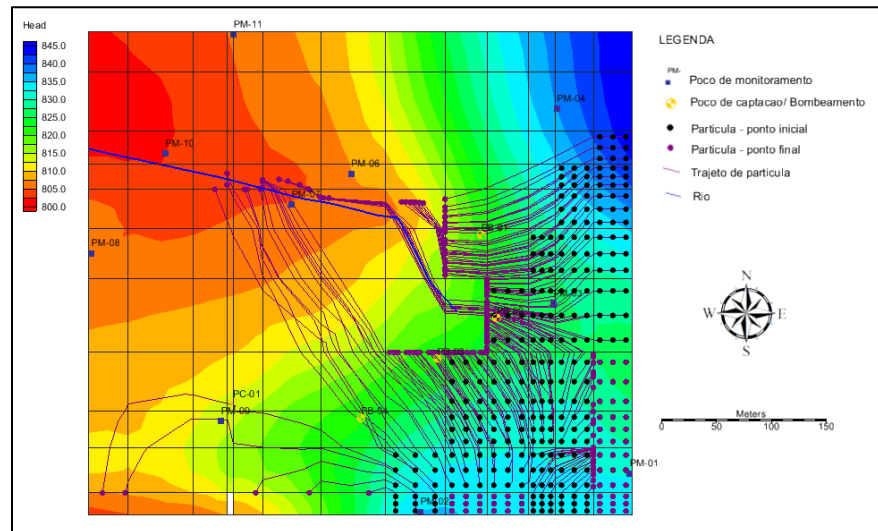
A ativação do poço de captação gera uma mudança no fluxo das águas subterrâneas, no entanto essa alteração não é suficiente para que o poço possa capturar partículas ou mesmo para que estas não cheguem ao rio. Tal fato decorre dos diferentes materiais pelos quais a água transita, conforme a mudança do nível freático e das características condutivas dos mesmos. É notável, apenas, que as partículas atingem o rio mais a jusante, conforme observado na Figura 11B. Portanto, independente da ativação da barreira hidráulica constatou-se que o poço tubular profundo utilizado para captação e consumo humano não está ameaçado pela contaminação no cenário avaliado.

Por fim, com a ativação dos quatro poços de bombeamento propostos para a intervenção é evidente o êxito da barreira hidráulica, com todas as partículas convergindo para ela (Figura 11C). Neste cenário nenhuma partícula atinge o poço de captação ou o rio. É interessante observar que o poço PB-04, localizado na porção centro inferior da área, não captura efetivamente nenhuma partícula, contudo este cumpre um papel fundamental no rebaixamento do aquífero, o que garante maior eficiência aos outros poços de bombeamento. Durante os testes foi observado que a diminuição da vazão de PB-04 ou mesmo seu desligamento resultam em perdas de partículas em todos os poços restantes. Corrigir tais perdas com o aumento da vazão nos outros poços é inviável, pois demandaria volumes muito maiores que os retirados de PB-04 (que responde pela menor vazão do conjunto) e causaria forte desequilíbrio no aquífero e potencialmente no rio. Desta forma entendeu-se que o custo de perfuração do poço PB-04 é vantajoso frente a todos os outros custos e ônus envolvidos.

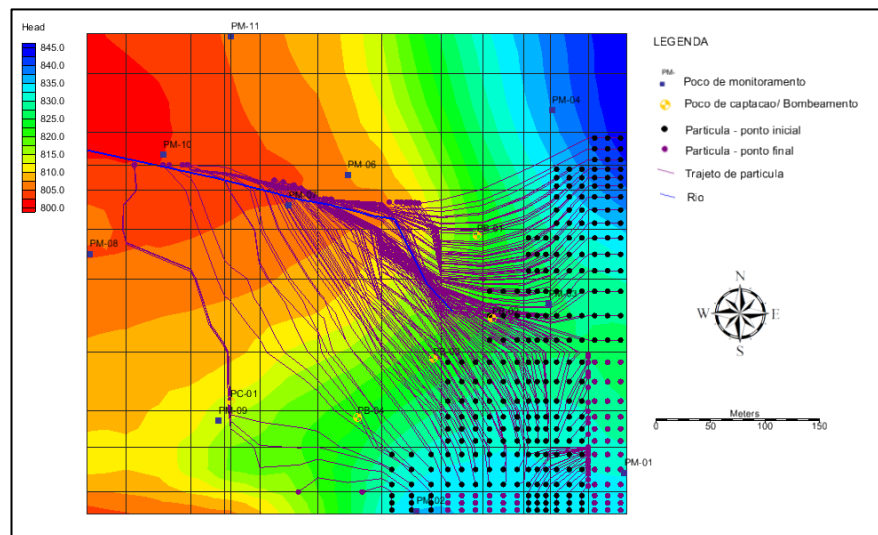
Uma observação interessante no cenário de captura ocorre no poço PB-02, que poderia ter sua vazão reduzida para 47,6 m³/d, durante a estação chuvosa, diminuindo a vazão total em 48m³/mês. Tal fato decorre dos diferentes materiais pelos quais a água transita, conforme a mudança do nível freático e das características condutivas dos mesmos.

Figura 11 Migração de partículas no aquífero - estação chuvosa

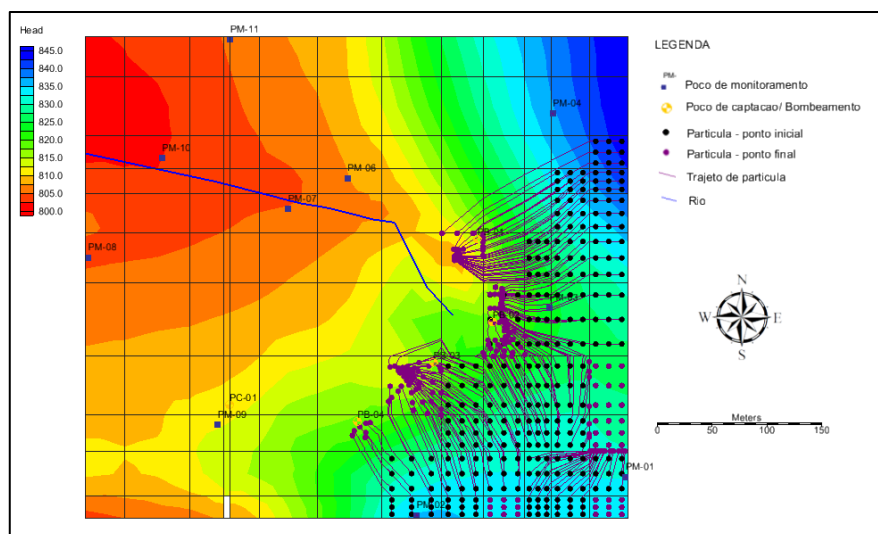
A)



B)



C)



Legenda: Trajetória das partículas durante o período chuvoso em diferentes cenários. A) Aquífero sem qualquer interferência. B) Apenas poço de captação ativo. C) Poços de captação e bombeamento ativos.

6.2. ESTIAGEM

Em comparação com o período de chuvas, o período de estiagem apresenta um rebaixamento no nível freático (menor recarga) e um maior deslocamento das partículas no interior do aquífero. Diferentemente do observado na Figura 11A, durante a estiagem as partículas deixam de atingir o rio na área de nascente e passam a interceptar as águas superficiais apenas na área intermediária e até final do modelo, como é apresentado na Figura 12A.

A ativação do poço tubular profundo de captação gera pequenas alterações no fluxo subterrâneo, porém, novamente, essas mudanças não se mostram suficientemente fortes para alterar o cenário como um todo. As partículas seguem se direcionando para o rio, sem qualquer possibilidade de serem capturadas pelo poço, como pode ser observado na Figura 12B.

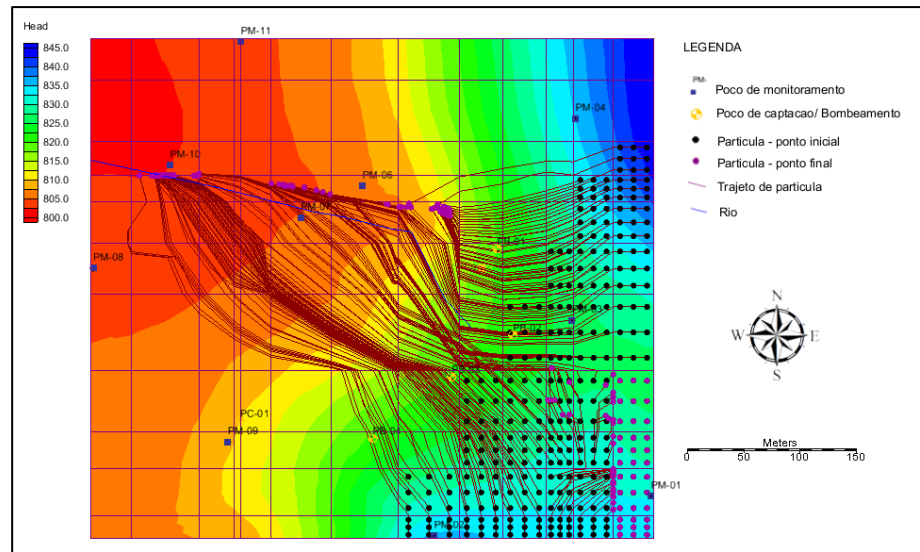
Finalmente, com a ativação dos poços da barreira hidráulica todas as partículas passam a ser capturadas pelo sistema. Novamente é possível observar a função diferenciada do poço PB-04, que segue sem capturar partículas (Figura 12C).

6.3. INCERTEZAS

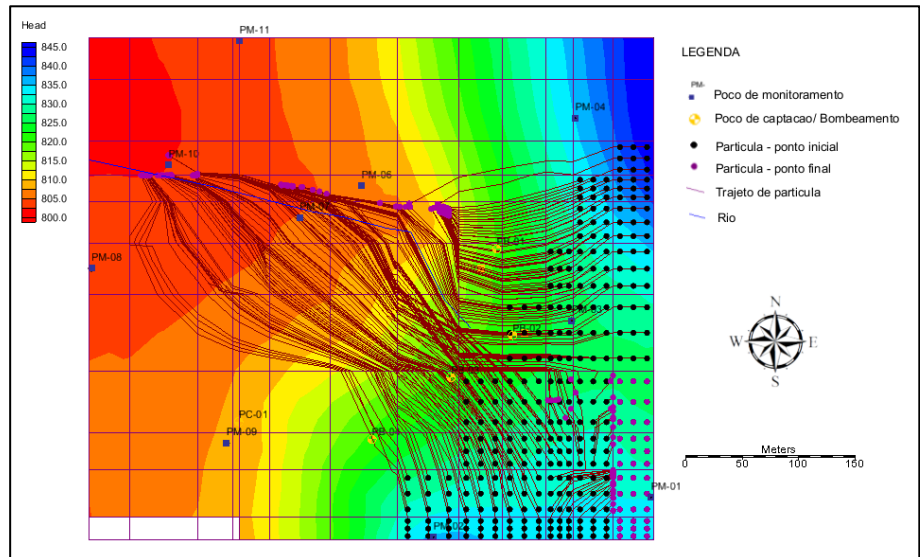
A incerteza é comum a todo processo de modelagem de fenômenos ou meios naturais, pois a aquisição de um conjunto integral de dados com elevada precisão e acurácia é inviável visto os custos e a complexidade dos sistemas. Desta forma, é certo que o processo decisório do pesquisador e modelador influencia no produto, desde a escolha e/ou aquisição dos dados de base, interpretação do modelo conceitual e até a definição dos critérios de interpolação. Neste estudo foram utilizados dados de diversas naturezas (primários, secundários, diretos, processados) o que certamente gera incertezas sobre o modelo. A aquisição de mais dados próprios da área modelada, substituindo ou corroborando dados retirados da literatura, assim como adicionando aos dados já obtidos no local sem dúvidas tornariam o modelo ainda mais sólido e confiável. No entanto, é importante destacar que o modelo apresenta altíssimas taxas de acerto no balanço de massa e as barreiras propostas apresentam 100% de eficácia. Dessa forma, pode se considerar um modelo sólido e com uma boa margem de confiança para os objetivos propostos.

Figura 12 Migração de partículas no aquífero - estação seca

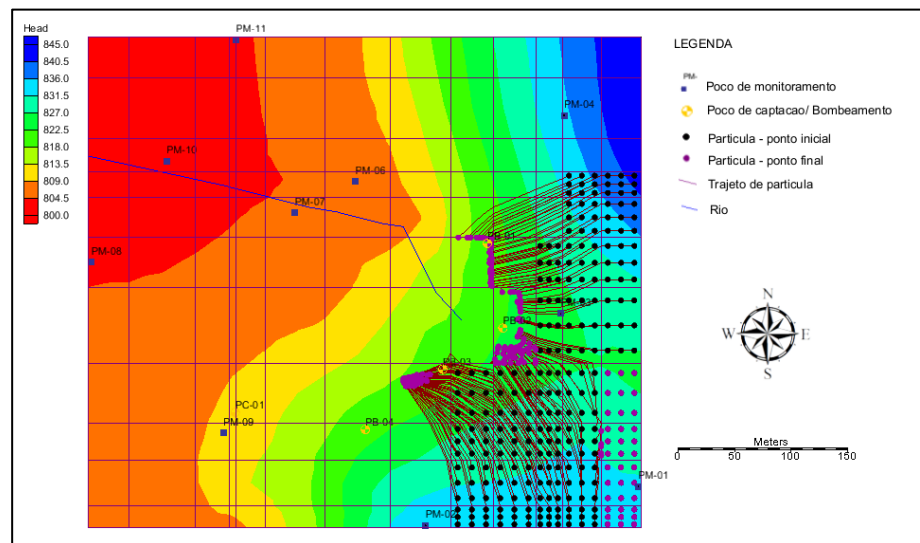
A)



B)



C)



Legenda: Trajetória das partículas durante o período de estiagem em diferentes cenários. A) Aquífero sem qualquer interferência. B) Apenas poço de captação ativado. C) Poços de captação e bombeamento ativados.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A instalação de uma barreira hidráulica se mostrou uma proposta de intervenção viável para a área de estudo. O modelo numérico comprovou que uma barreira composta de quatro poços consegue capturar todas as partículas de contaminantes provenientes da superfície na área fonte e lixiviadas para o aquífero.

A partir dos resultados obtidos neste estudo, o responsável pelo gerenciamento desta área poderia tomar uma decisão mais assertiva sobre a intervenção, já tendo a certeza da eficácia da alternativa e todos os custos envolvidos, seja para instalação da barreira (quatro poços) seja para sua operação (vazões e volumes).

Outro resultado importante para o gerenciamento dessa área e para os agentes envolvidos foi a confirmação de que o poço de captação para consumo humano não é influenciado pela pluma de contaminação, em nenhum dos cenários avaliados. Desta forma, ainda que a barreira não fosse adotada pelo gestor da área, o modelo justifica sua realização, pois já retira um dos bens a proteger da lista de preocupações.

A aquisição de novos dados na área de estudo, especialmente os relacionados às condutividades das camadas e condutância do leito do rio, trariam mais robustez ao modelo. Isso permitiria uma melhor calibração e até mesmo sua utilização para um eventual modelo de transporte aplicado a outras técnicas de intervenção, como oxidação química, biorremediação, barreiras reativas, etc. Contudo, considerando que o objetivo deste estudo era a implantação de uma barreira hidráulica eficaz e eficiente, os resultados obtidos são considerados satisfatórios.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling**: simulation of flow and advective transport. San Diego: Academic Press, Inc., 1992. 381 p.
- BEAR, Jacob; VERRUIJT, A. **Modeling Groundwater Flow and Pollution**: theory and applications of transport in porous media. Boston: D. Reidel Publishing Co, 1987. 414 p.
- BERENICE, Aline Michelle. **Evolução da Contaminação por nitrato em aquíferos urbanos**: estudo de caso em urânia (sp). 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Minerais e Hidrogeologia, USP, São Paulo, 2010.
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1962. Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, 7:1-164.
- CARVALHO P.F. 1934. Geologia do município de Curitiba. **Boletim DNPM-SGM**, 82:1-21.
- CHUNG, Young Wook; KIM, Juyoul; KONG, Sung-Ho. Performance Prediction of Permeable Reactive Barriers by Three-Dimensional Groundwater Flow Simulation. **International Journal Of Environmental Science And Development**, [S.L.], p. 138-141, 2011. EJournal Publishing. <http://dx.doi.org/10.7763/ijesd.2011.v2.111>.
- CLEARY, R. W. Hidrologia de águas subterrâneas. In: RAMOS, Fábio et al. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. p. 293-404.
- COIMBRA A.M., RICCOMINI C., SANT'ANNA L.G., VALARELLI J.V. 1996. Bacia de Curitiba: estratigrafia e correlações regionais. In: 39º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, **Anais**, v. 1, p. 135-137.
- CUNHA, Paola Viana de Castro. **Gênese de calcretes da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba, Paraná**. 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <<http://educapes.capes.gov.br/handle/1884/26941>>. Acesso em: 25 set. 2021.
- FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. New York: Macmillan Publishing Company, 3º ed., 314 p., 1994.
- FRANKE, O. R.; REILLY, T. E.; BENNET, G. D.. Definition of Boundary and Initial Conditions in the Analysis of Saturated Ground-Water Flow Systems: an introduction. In: SURVEY, U. S. Geological. **Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geological Survey**: applications of hydraulics. Reston: U.s. G.P.O., 1987. Cap. B5, p. 15.
- GOLDEN SOFTWARE, LLC, **SURFER**, versão 16 trial. Colorado, Estados Unidos, 2021.
- IRITANI, Mara Akie **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. 200 f Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1999. <http://dx.doi.org/10.11606/T.44.1999.tde-16082013-125326> Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-16082013-125326/publico/Iritani_doutorado.pdf. Acesso em: 22 out. 2021.

MCDONALD, M.G.; HARBAUGH, A.W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. **Open-File Report**, [S.L.], 1984. US Geological Survey. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr83875>.

Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/1983/0875/report.pdf>. Acesso em: 15 out. 2021.

MULLER, Camila de Vasconcelos et al. ANÁLISE HIDROGEOQUÍMICA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA – PR. **Águas Subterrâneas**, [s.l.], v. 22, n. 1, p.25-38, 8 jun. 2008. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v22i1.17021>. Disponível em:

<<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/17021>>. Acesso em: 25 set. 2021.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. C.; FERRARI, A. L. 2004. Evolução geológica do rift continental do sudeste brasileiro. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R; BRITO NEVES, B. B. (Org). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio de Almeida**. São Paulo: Beca, p. 383-405.

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L. **Aquíferos do Estado do Paraná**. Curitiba: Edição do Autor, 2011

SALAMUNI, Eduardo et al. Tectonics and sedimentation in the Curitiba Basin, south of Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, n. 15, p.901-910, 2003. Disponível em: <<http://www.neotectonica.ufpr.br/grupo-artigos/tectonics.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2021.

WALTON, W C. **Groundwater modeling utilities** EUA: CRC Press, 1ªed., 640 p., 1992.

WANG, Hebert F.; ANDERSON, Mary P. **Introdução to groundwater modeling: finite difference and finite element methods**. San Diego: Academic Press, Inc., 1982. 245 p.