

AVALIAÇÃO DE SISTEMA DE REMEDIAÇÃO DO TIPO “PUMP AND TREAT” COM O USO DE MGO (MODULAR GROUNDWATER OPTIMIZER) – APLICAÇÃO NO CASO DO ATERRO VOLTA GRANDE EM VOLTA REDONDA – RJ

Paulo Henrique Pereira dos Santos¹, Ana Paula Spolidoro Queiroz¹, Flávio de Souza Lima¹, Humberto Lusvarghi Neto¹, Pedro Pessoa Dib² Malva Andrea Mancuso³

Resumo

A aplicação de modelos matemáticos para simulação de situações reais e hipotéticas (futuras) de fluxo da água subterrânea e de transportes de contaminantes tem sido amplamente utilizada para tomada de decisões estratégicas quanto ao tipo de tecnologia e arranjos de sistemas de remediação em áreas contaminadas.

Associado a esses simuladores de fluxo e transporte é que se insere o “Modular Groundwater Optimizer”, ou simplesmente MGO, desenvolvido por ZHENG e WANG (2002) com a cooperação da Groundwater Systems Research Ltd. O MGO é um código de otimização em simulações com fluxo de água subterrânea que pode ser utilizado para redução de custos associados com a instalação e operação de sistemas de bombeamento de água subterrânea contaminada.

Com a necessidade de reavaliação de sistema de bombeamento existente no Aterro Volta Grande, no município de Volta Redonda (RJ), sugeriu-se a aplicação do código MGO, para verificar e propor formas de otimização do sistema em operação.

A estratégia para minimizar o custo de operação do sistema identificou uma alternativa de solução ideal que atingiria os objetivos de remediação em 8,5 anos de operação e reduziria em cerca de R\$ 1 milhão quando comparada com a escolha atualmente implementada.

Abstract

The application of mathematical models for simulation of real and hypothetical situations (future) of groundwater flow and transport of contaminants has been widely used for making strategic decisions about the type of technology and arrangements of remediation systems in contaminated areas.

¹ Waterloo Brasil Ltda., R. Deputado Lacerda Franco 300, cj 121 São Paulo – SP CEP 05418-000, Fone 11 3030 9344, whs@waterloo.com.br.

² Sanifox do Brasil - Serviço de Remediação Ltda

³ PhD, Research Officer – Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Portugal

Associated with these flow and transport simulations is included the "Modular Groundwater Optimizer", or simply MGO, developed by ZHENG and WANG (2002) with the cooperation of Groundwater Systems Research Ltd. The MGO is an optimization code in flow and transport of contaminants in groundwater that can be used to reduce costs associated with the installation and operation of pump and treat systems.

With the need for reassessment of the pump and treat system installed at Volta Grande Landfill, in Volta Redonda (RJ), was suggested the application of the MGO code, both to evaluate and propose ways of optimizing the system into operation as to assess the applicability of MGO in real cases.

The strategy to minimize the cost of operating the system identified an ideal solution that will meet the objectives of remediation at 8.5 years of operation and reduce by about R\$ 1 million when compared with the choice implemented.

Palavras Chaves

Modelagem Matemática, Otimização, Contaminação, Naftaleno, Remediação.

1. INTRODUÇÃO

Os trabalhos de remediação de água subterrânea em locais contaminados estão associados a um enorme custo operacional, amortizados ao longo dos anos de operação. De acordo com estudos realizados pela USEPA (2004), os custos de remediação de áreas já conhecidas nos Estados Unidos, com solo e água subterrânea contaminados são da ordem de 209 bilhões de dólares americanos, distribuídos numa média anual de 6 a 8 bilhões de dólares por ano o longo de 30 a 35 anos para completar os trabalhos necessários. Grande parte deste custo está associada à operação de sistemas de remediação do tipo bombeamento e tratamento ("pump-and-treat").

No Brasil, CETESB (2007) disponibiliza dados referentes ao cadastramento de áreas contaminadas, onde é feita uma análise dos casos cadastrados na agência.

Do total de casos onde se tem informações sobre a técnica de remediação aplicada (1781), 472 casos, ou 26% do total, é aplicada a técnica de bombeamento e tratamento.

A aplicação de modelos matemáticos para simulação de situações reais e hipotéticas (futuras) de fluxo da água subterrânea e de transportes de contaminantes tem sido amplamente utilizada para tomada de decisões estratégicas quanto à forma de remediação e arranjos de sistemas de remediação de áreas contaminadas. Associado a esses simuladores de fluxo e transporte é que se insere o "Modular Groundwater

Optimizer”, ou simplesmente MGO, desenvolvido em cooperação com a Groundwater Systems Research Ltd (ZHENG & WANG, 2002).

O MGO é uma ferramenta numérica para otimização de sistemas em simulações com fluxo e transporte de água subterrânea que pode ser utilizado para redução de custos associados com a instalação e operação de sistemas de bombeamento e tratamento de água subterrânea contaminada. Embora o MGO possa ser utilizado numa variedade de atividades de gerenciamento e pesquisa da água subterrânea e em outros tipos de sistemas de remediação, como por exemplo, bioremediação, o foco deste trabalho se dará na aplicação do MGO para otimização de sistemas de bombeamento e tratamento.

A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) tem realizado trabalhos de investigação ambiental na área do Aterro Volta Grande, localizada no bairro Volta Grande, município de Volta Redonda (RJ) desde o ano de 2000, onde foram detectados e mapeados compostos que alteraram a qualidade da água subterrânea em área adjacente à ocupação urbana.

Esta área foi selecionada para utilização do MGO como ferramenta pela disponibilidade dos dados gerados desde 2000 e por ser uma área onde há aplicação de sistemas de bombeamento e tratamento de pluma de fase dissolvida (no caso do composto Naftaleno).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é aplicar e avaliar os resultados do uso do código numérico de simulação e otimização “Modular Groundwater Optimizer” ou MGO (ZHENG & WANG, 2002) em um caso real de sistema de bombeamento e tratamento de pequeno porte.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos adotados para a pesquisa foram:

a) definição da proposta de trabalho: esta etapa consistiu na definição do tema e dos objetivos, de forma a identificar o assunto estudado e os objetivos a serem atingidos.

b) definição do modelo conceitual: busca e seleção das informações disponíveis, provindas de trabalhos de diagnósticos ambientais (investigações confirmatórias e detalhadas) e bibliografia.

c) seleção do software: escolha do programa de computador adequado para os objetivos do trabalho;

d) definição do modelo matemático de fluxo e transporte: compilação, interpretação, simplificação e calibração do modelo conceitual de forma a torná-lo passível de ser calculado por um programa de computador;

e) aplicação do MGO: utilização da rotina de otimização desenvolvida por ZHENG & WANG (2002) para avaliação do sistema de remediação proposto; e

f) avaliação dos resultados da otimização: obtenção dos resultados da otimização, comparando com as decisões tomadas sem a utilização do MGO.

Os aspectos de desenho do sistema considerados para alteração foram os seguintes: vazão total bombeada, localização dos poços de bombeamento, número de poços de bombeamento, tempo de operação e objetivos da remediação (contenção da pluma ou remoção agressiva).

4. ÁREA DE ESTUDO E HISTÓRICO DA CONTAMINAÇÃO

A área de estudo está localizada no município de Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro, no bairro Volta Grande. A Figura 1 mostra a localização da área estudada.

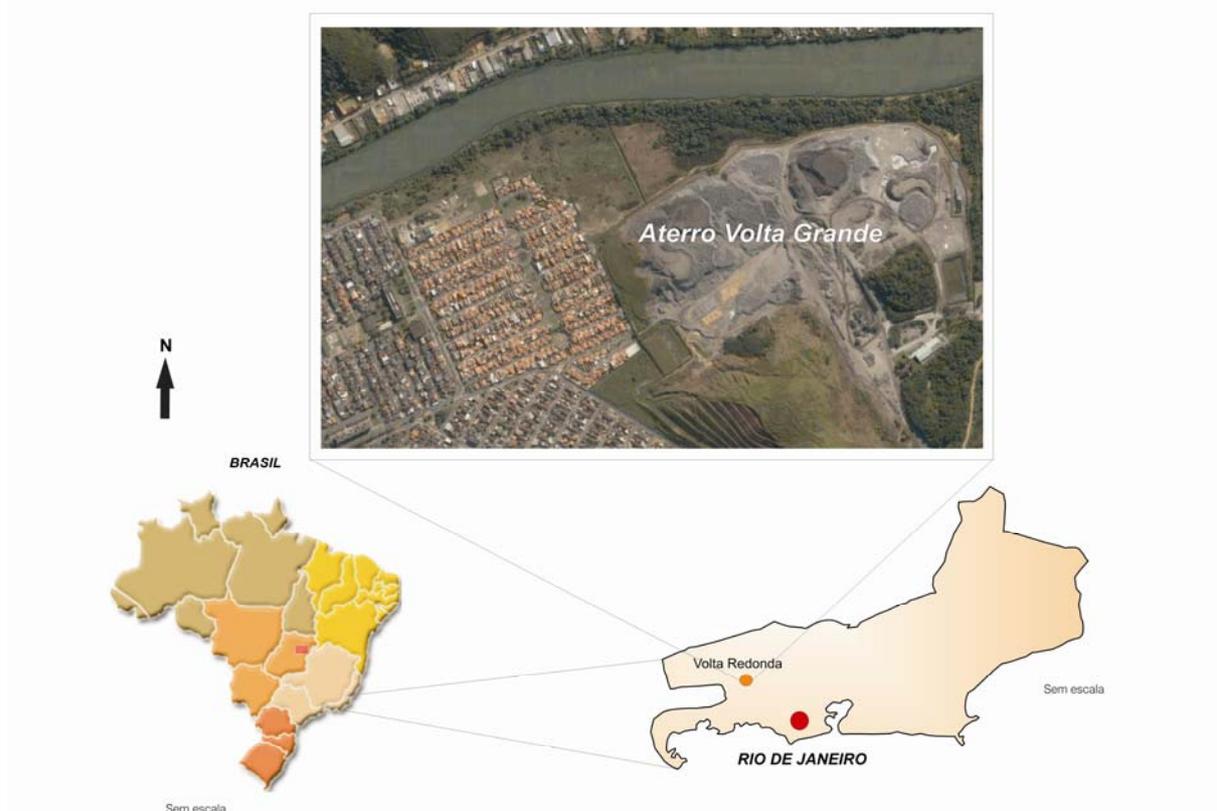


Figura 1: localização da área de estudo

Em 2001 a Waterloo Brasil realizou trabalho de investigação ambiental para qualificar e quantificar a extensão do comprometimento da qualidade do solo e água subterrânea local. Fez parte do trabalho a elaboração de modelo matemático de fluxo da água subterrânea e dos produtos existentes e propor, com base nos resultados obtidos soluções de remediação da água subterrânea.

Com base neste trabalho, que indicou como principal contaminante o Naftaleno, conforme ilustra a figura 2, foi implantado um sistema de remediação por bombeamento e tratamento da água subterrânea, que entrou em operação no ano de 2001.

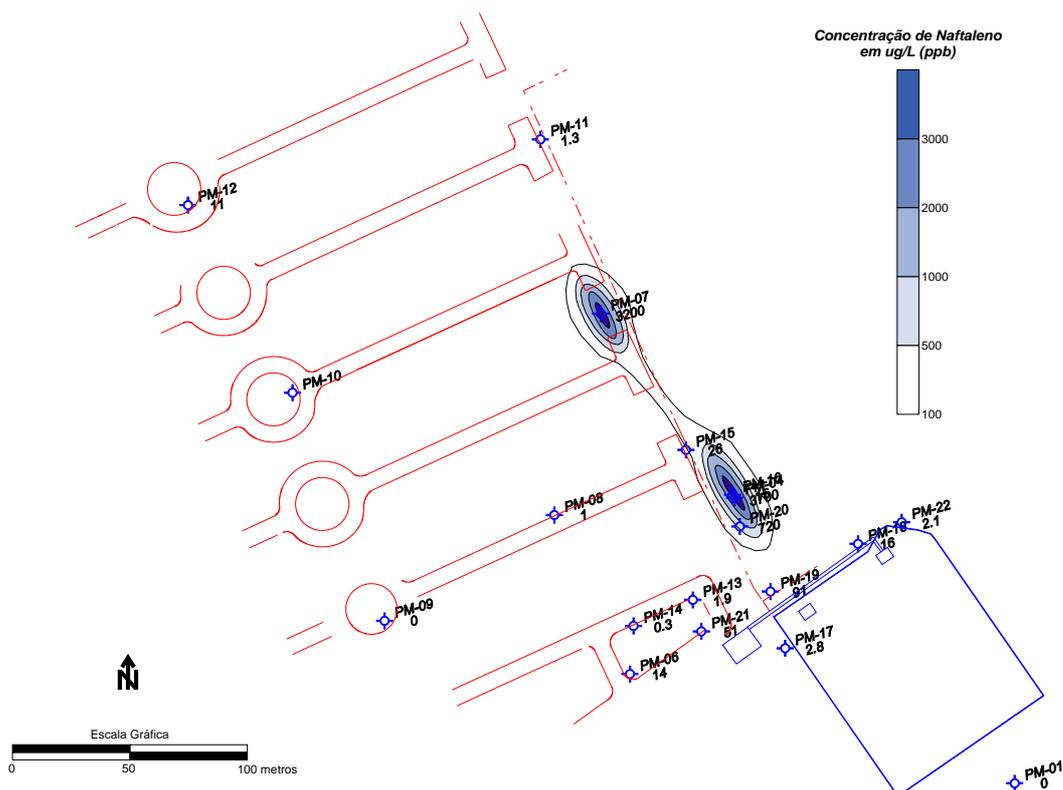


Figura 2: Situação da pluma de Naftaleno na água subterrânea em 2001

Em 2004, após 3 anos de operação foi sugerida e elaborada a avaliação da sua performance, onde foi determinada nova configuração da pluma do principal contaminante, conforme a figura 3 e conseqüentemente a adequação do sistema de remediação. Após esta etapa foi sugerida a aplicação do MGO, com a intenção de otimizar o sistema implantado, reduzindo os seus custos operacionais.

- Sedimentos aluvionares; e
- Solo de alteração de rocha

As condições de contorno adotadas no modelo conceitual foram o Rio Paraíba do Sul a Norte e a Oeste da área; afloramentos de rocha nos limites inferior (vertical) do modelo e porção Sul-Leste da área.

5.2. Modelo numérico

Foi selecionado para a simulação do sistema de fluxo de água subterrânea o programa MODFLOW de McDONALD e HARBAUGH (1988) desenvolvido pela U.S. Geological Survey e atualizado por MEHL e HILL (2001).

Associado ao MODFLOW, o programa MODPATH de POLLOCK (1989, 1994) foi utilizado para efetuar o cálculo de trajetória de partículas. O programa MT3DMS (Modular 3-Dimensional Multi-Species Transport Model) desenvolvido por ZHENG (1990) atualizado por ZHENG e WANG (1998) permite a simulação de transporte de compostos químicos.

Levando-se em conta o objetivo do trabalho, as condições do modelo existente para a área selecionada, a interface comercial Visual MODFLOW versão 4.0 da Waterloo Hydrogeologic Inc. (GUIGUER e FRANZ, 2003) foi escolhido por agregar todos os programas necessários para esta pesquisa, em uma única interface, inclusive por agregar em sua suíte o programa de otimização MGO (ZHENG 2002), foco desta pesquisa.

Desta forma, os programas utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- a) MODFLOW versão 1996;
- b) MODPATH versão 3.0: atualizado por POLLOCK (1994);
- c) MT3DMS versão 2003; e
- d) MGO versão 2002.

A elaboração do modelo numérico teve como base os limites definidos pelo modelo conceitual e sua calibração, avaliada através de gráficos do tipo “valor calculado versus valor observado”, sendo o erro normalizado inferior a 4,4% (RMS), conforme a figura 4.

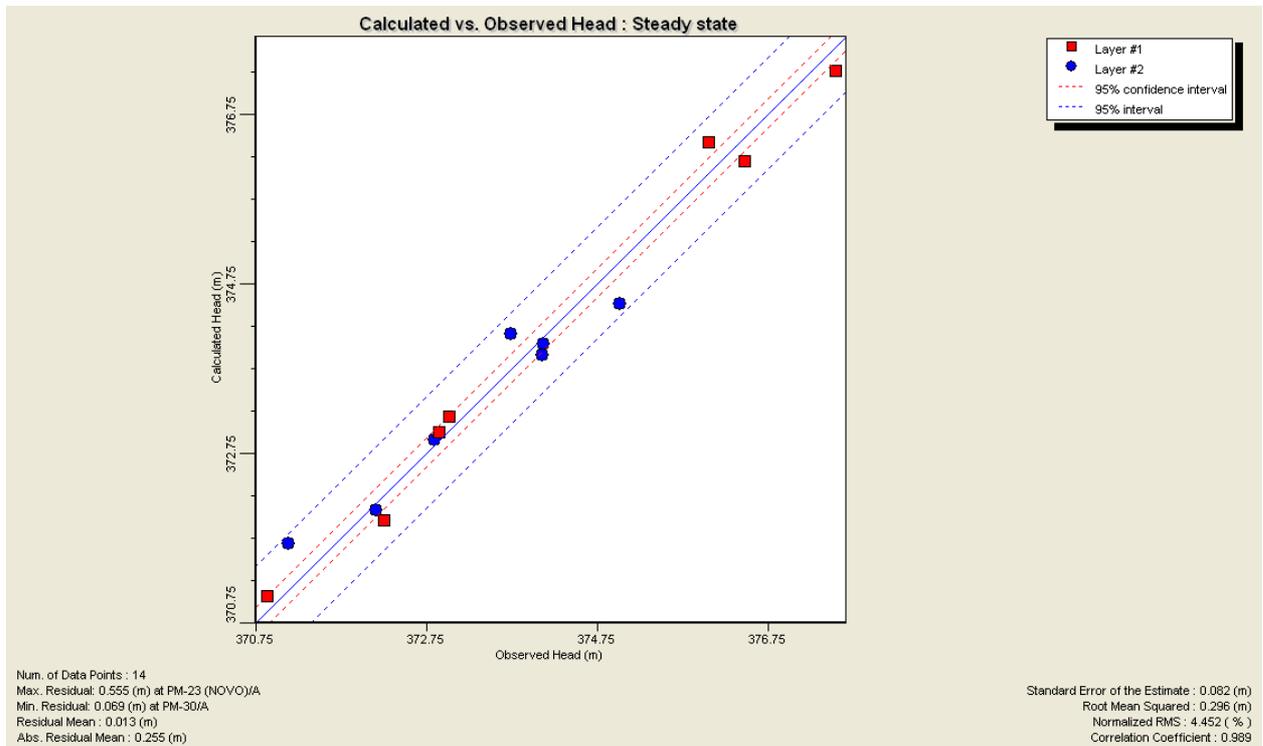


Figura 1: Gráfico da calibração do modelo de fluxo

Pode-se observar que o padrão geral de fluxo no modelo para o aquífero superior é concordante com a topografia local, com algumas distorções devido às diferentes zonas de condutividade hidráulica, conforme se pode verificar na figura 5.

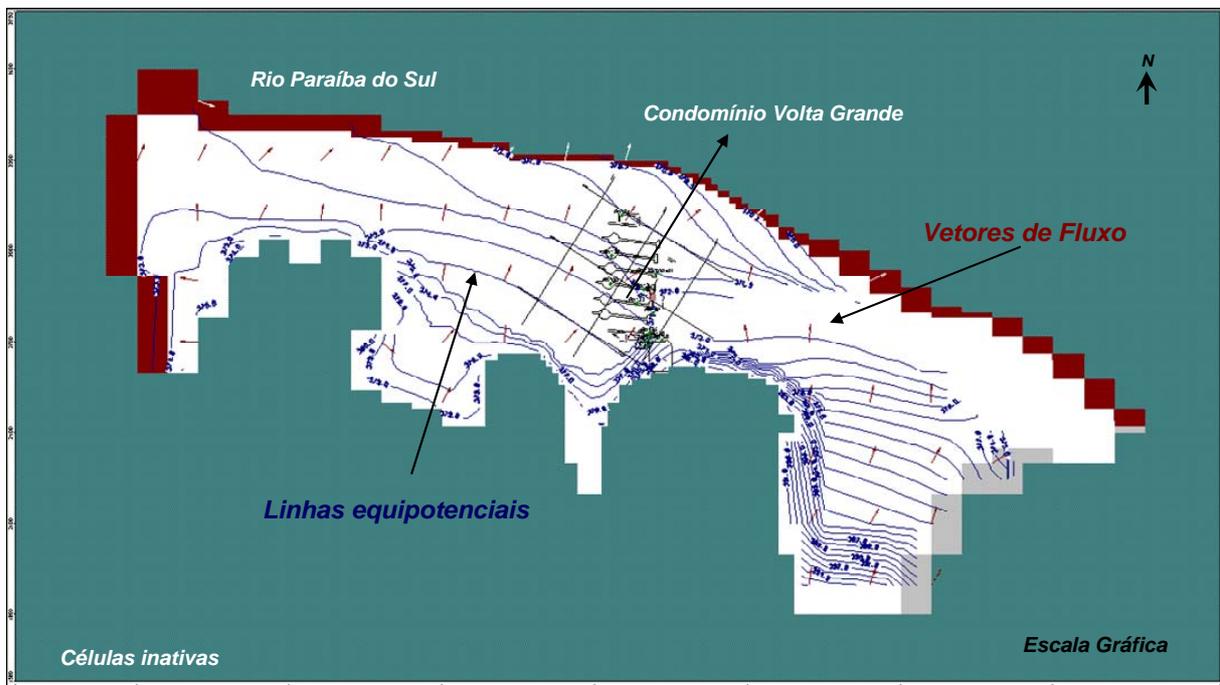


Figura 5: Mapa de fluxo da água subterrânea calculado pelo modelo

Para o modelo de transporte elaborado, a Figura 6 mostra uma configuração de remediação com 2 poços de bombeamento operando a uma vazão de 8 (PB-02) e 10 (PB-03) m³/dia (situação existente no momento).

A Figura 7 ilustra a configuração da pluma após 5 anos de operação, a Figura 8 ilustra a configuração da pluma após 10 anos de operação e a Figura 9 ilustra a configuração da pluma após 15 anos de operação.

Observa-se que a pluma, cuja geometria atual possui um único foco de alta concentração de Naftaleno, apresentaria configuração totalmente diferente após cinco anos, já que o foco a norte da área seria praticamente eliminado com o bombeamento.

O sistema levaria cerca de 8 anos para reduzir a pluma ao patamar de 100 ppb (nível na camada 2).

No entanto, quando observamos as duas condições, com e sem ação do sistema de bombeamento, nota-se que a atuação do bombeamento ocorre muito mais no controle da dispersão da pluma do que na efetividade de sua remoção.

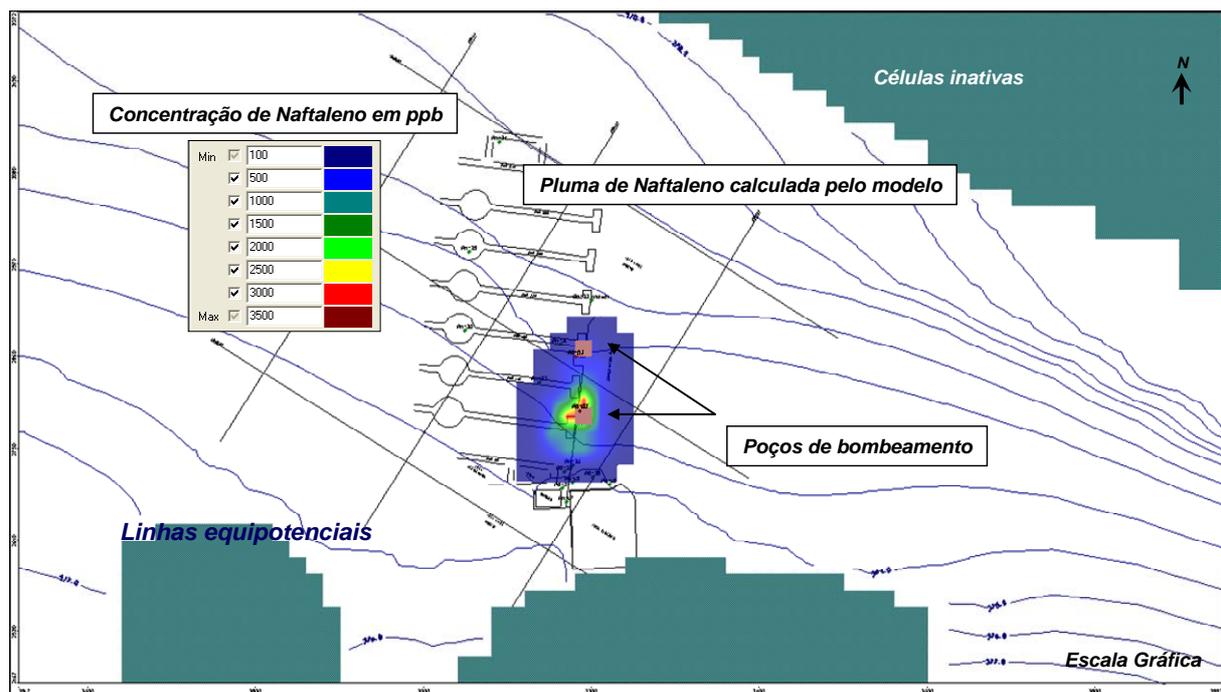


Figura 6: Simulação da pluma de Naftaleno com ação de 2 poços de bombeamento

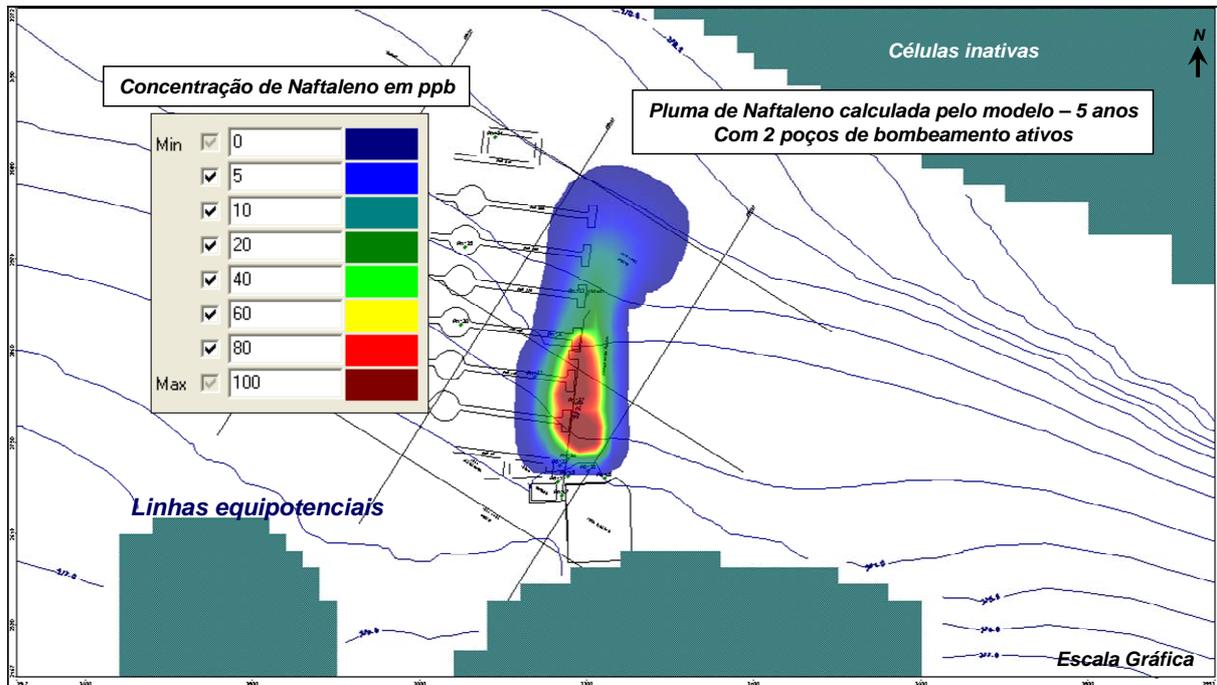


Figura 7: Simulação da pluma de Naftaleno com ação de remediação – tempo 5 anos

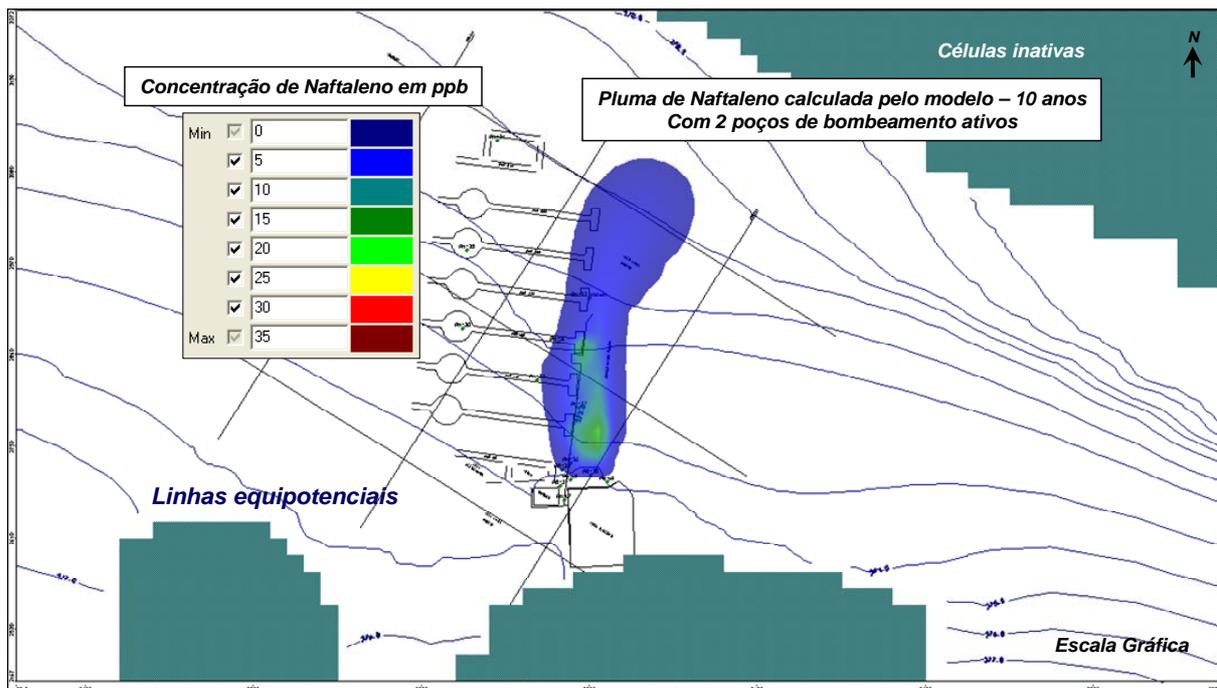


Figura 8: Simulação da pluma de Naftaleno com ação de remediação – tempo 10 anos

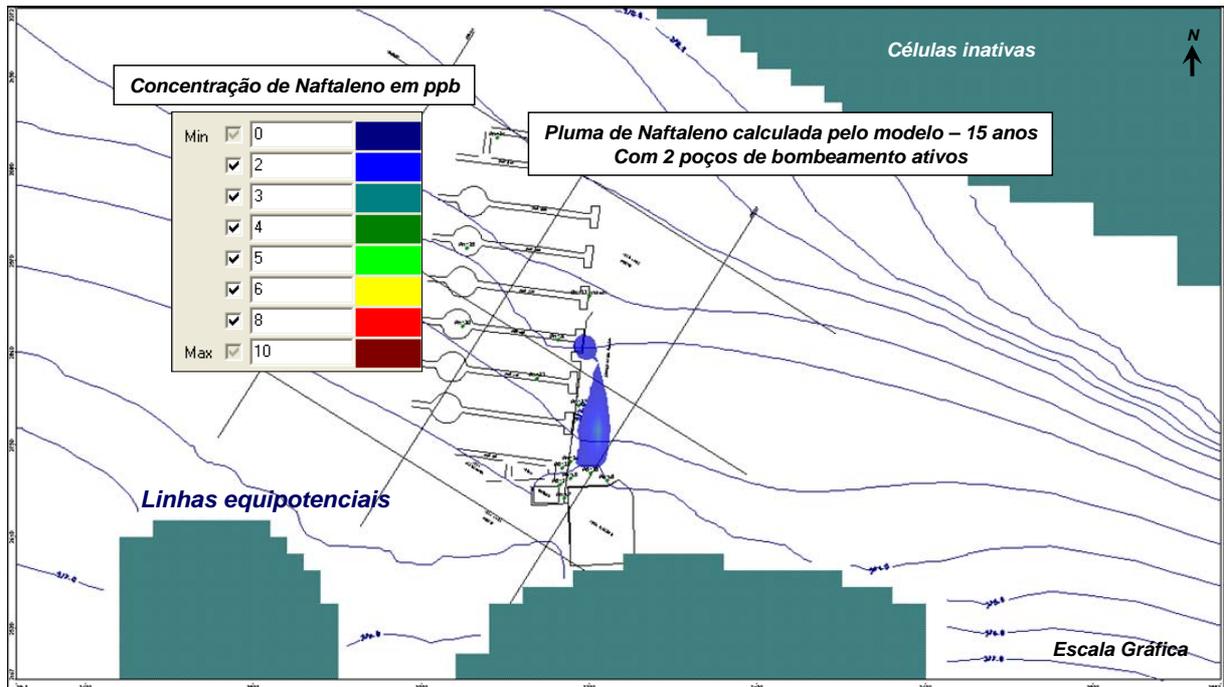


Figura 9: simulação da pluma de Naftaleno com ação de remediação – tempo 15 anos

5.3. Aplicação do MGO

Foram consideradas as seguintes estratégias e diretrizes:

- Estratégia voltada para minimização dos custos (de implantação e operacionais);
- Estratégia agressiva para redução da massa de contaminantes.

Como resultados, foram obtidos diferentes cenários para as situações acima propostas, que podem oferecer melhor base técnica para a tomada de decisão sobre a implantação do melhor sistema em função dos objetivos a serem atingidos.

A tabela 1 a seguir apresenta um sumário dos resultados obtidos:

A solução ótima obtida para a primeira formulação, que considera a otimização do sistema com objetivo final de redução de custos operacionais é ilustrada na figura 10.

Tabela 1: Sumário comparativo das formulações consideradas para o sistema de remediação do aterro Volta Grande

	Valores unitários	Sistema atual	<i>Formulação a:</i> minimizando custos operacionais	<i>Formulação b:</i> maximizando remoção de massa
Volume anual bombeado	-	5.475 m ³	2.208 m ³	15.669 m ³
Custo anual de operação	R\$ 45,66 / m ³	R\$ 250.000,00	R\$ 100.833,33	R\$ 715.500,00
Custo anual de monitoramento	R\$ 200.000,00	R\$ 200.000,00	R\$ 200.000,00	R\$ 200.000,00
Custo anual de energia	R\$ 2,19 / m ³	R\$ 12.000,00	R\$ 4.840,00	R\$ 34.344,00
Valor anual	R\$ 47,85 / m ³	R\$ 462.000,00	R\$ 307.881,58	R\$ 965.513,45
Instalação de poços	R\$ 50.000,00 / poço	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 150.000,00
Tempo de operação (anos)	-	8	8.5	7
Valor total		R\$ 3.696.000,00	R\$ 2.616.993,46	R\$ 6.908.594,15

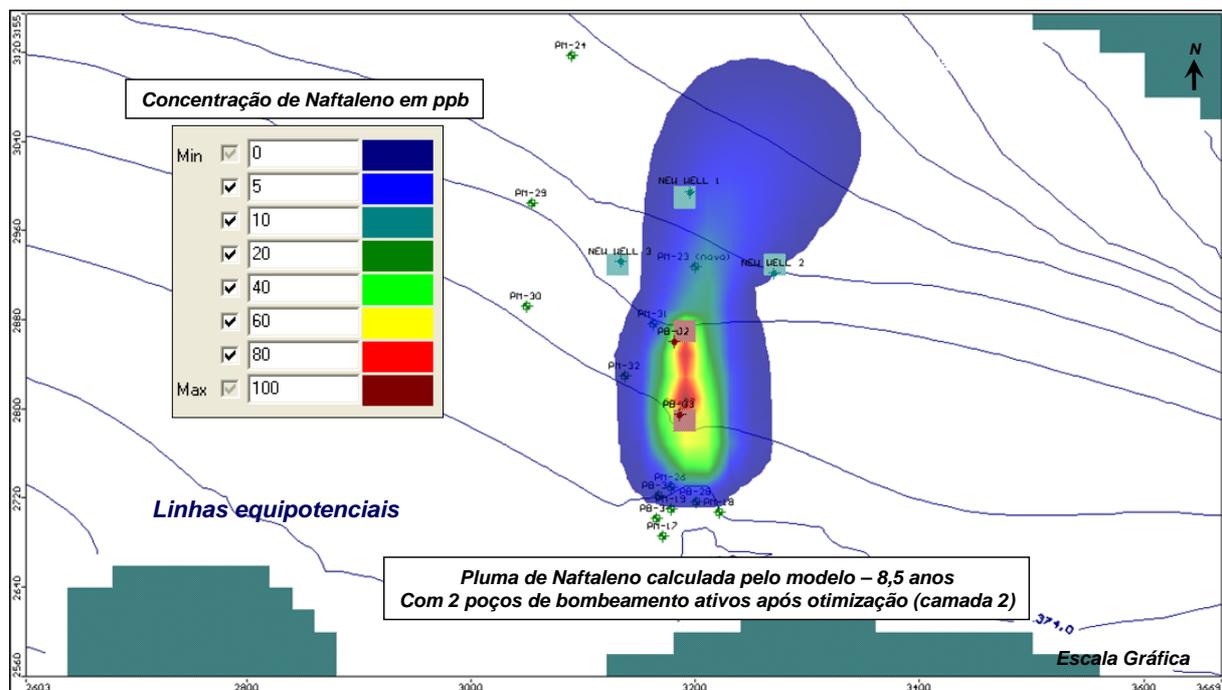


Figura 10: Solução ótima com 2 poços de bombeamento

A estratégia consiste em utilizar os 2 poços de bombeamento existentes e ajustar suas taxas de bombeamento de forma a reduzir o custo operacional do sistema sem extrapolar o prazo máximo estabelecido para se atingir os valores alvo de remediação para no Naftaleno na área.

O resultado apontou para um regime de operação cujas vazões dos poços devem ser 1,4 m³/dia para o poço PB-02 e 4,8 m³/dia para o poço PB-03.

O custo total para a alternativa é de cerca de R\$ 2.600.000,00 com operação do sistema por 8,5 anos. Quanto comparado com os custos de operação do sistema atual há uma economia da ordem de R\$1.000.000,00 e um aumento de apenas 6 meses na operação do sistema.

A solução ótima obtida para a segunda formulação, que considera a otimização do sistema com objetivo final de máxima remoção de massa de Naftaleno é ilustrada na figura 11.

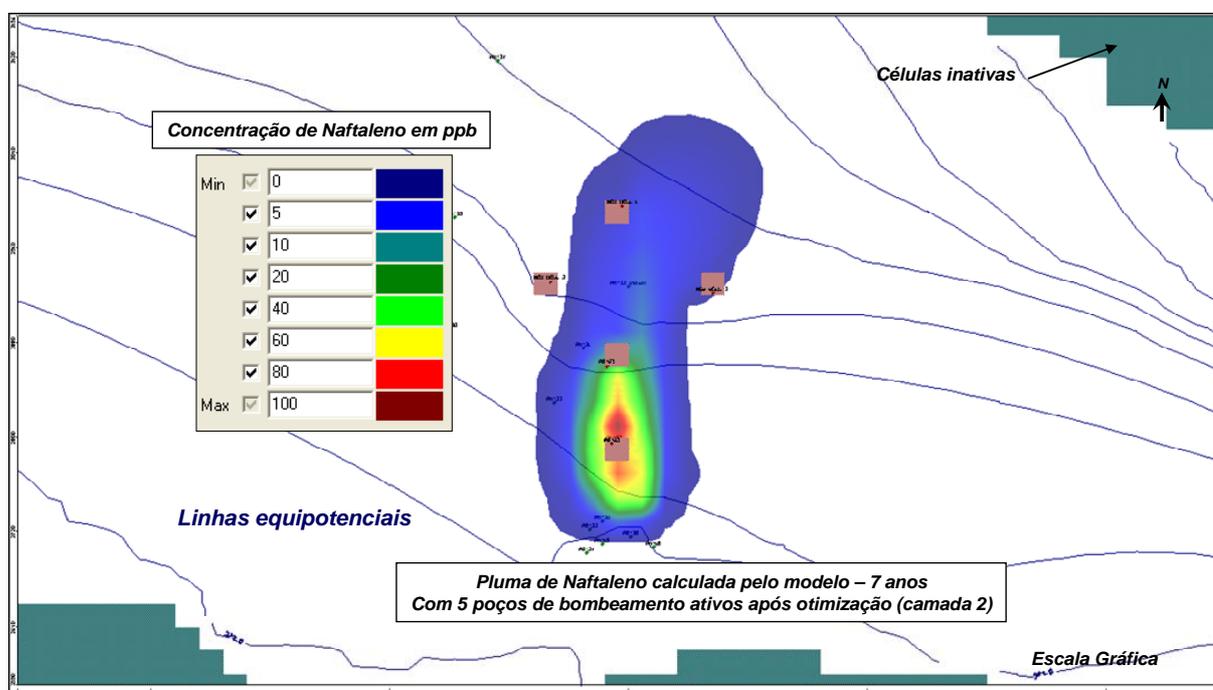


Figura 11: Solução ótima considerando máxima remoção de massa

A estratégia consiste em utilizar os 2 poços de bombeamento existentes e adicionar 3 novos poços de extração de forma a ajustar suas taxas de bombeamento de forma a promover a máxima remoção de massa de contaminantes no menor espaço de tempo, respeitando as restrições estabelecidas.

O resultado apontou para um regime de operação cujas vazões dos poços devem ser 8,3 m³/dia para os poços PB-02 e PB-03 e 8,7 m³/dia para os 3 novos poços.

O custo total para a alternativa é de cerca de R\$ 6.900.000,00 com operação do sistema por 7 anos. Quanto comparado com os custos de operação do sistema atual há

uma demanda adicional da ordem de R\$3.300.000,00 e uma redução no tempo de operação de apenas 1 ano.

Este custo adicional é causado pelo aumento no volume total bombeado, uma vez que os custos fixos anuais estão ligados apenas as campanhas de monitoramento e os custos variáveis (custo de recursos operacionais e de energia elétrica) associados diretamente ao volume bombeado.

6. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

O estudo teve o propósito de comparar quais as possibilidades que poderiam ter sido obtidas anteriormente a implantação do sistema, oferecendo assim uma gama maior e de melhor qualidade nas opções para implementação do sistema de remediação proposto.

A estratégia para minimizar o custo de operação do sistema identificou uma solução ideal que atingirá os objetivos de remediação em 8,5 anos de operação a um custo total de R\$ 2,6 milhões em valores atuais. A solução ótima utiliza os dois poços de bombeamento, mas com vazões de extração minimizadas com o objetivo de reduzir o volume bombeado.

Esta solução reduz em cerca de R\$ 1 milhão quando comparado com a escolha implementada, apesar de aumentar o tempo para se atingir a meta de remediação em 6 meses.

A estratégia de maximizar a remoção de massa dos contaminantes identificou uma situação ótima que atingirá os objetivos de remediação em 7 anos de operação, a um custo total de R\$6,9 milhões. A solução ótima utiliza 5 poços de bombeamento com vazões entre 8,3 e 8,7 m³/dia, maximizando a remoção de massa do contaminante.

A solução, cujo objetivo era promover a remediação num menor espaço de tempo, reduz em apenas 1 ano, de 8 para 7 anos, a operação do sistema, a um custo adicional de R\$ 3,3 milhões.

O resultado desta solução indica um alto custo adicional, diretamente proporcional ao volume bombeado, sem, no entanto, reduzir de forma significativa o tempo de operação do sistema.

Outros pontos importantes observados que merecem destaque foram:

- A respeito dos recursos computacionais necessários, as técnicas utilizadas foram aplicadas com sucesso à área do aterro Volta Grande. Todos os modelos foram gerados em computadores com processador Intel Centrino e memória RAM de 1 GB.

- Para sistemas de bombeamento e tratamento onde os custos totais são dominados pelo volume a ser bombeado, uma simples função objetivo como minimizar os custos do sistema pode ser utilizada ao invés de uma função objetivo mais complexa;
- A utilização de rotinas de otimização antes da implantação de determinado sistema, ou durante a etapa de definição do melhor desenho, levando em conta funções objetivo previamente definidas, proporciona o melhor planejamento operacional das atividades de remediação e melhor embasamento para justificar as escolhas estabelecidas;
- Destaca-se a importância da calibração em modelos matemáticos, que deve incluir também a avaliação geral das condições e das possibilidades reais do processo simulado; e
- Estabelecer parâmetros do meio físico com base em ensaios e dados reais da área, de forma que as restrições possam retratar a realidade.

Diante dos resultados obtidos é possível concluir que a utilização da rotina de otimização MGO, para o caso do aterro Volta Grande possibilitou a visualização de alternativas mais eficientes e de melhor custo/benefício do que a escolhida pelo processo de tentativa e erro. No entanto é necessário que o modelo de fluxo e de transporte seja representativo com os dados de campo.

Foi possível observar que, no caso do aterro Volta Grande, pela configuração da pluma, de pequena dimensão e com um centro de massa definido, as soluções ótimas definidas pelo MGO são muito similares às encontradas por tentativa e erro. Mas mesmo assim a ferramenta deve ser considerada como de suma importância para definição da configuração ideal para o sistema.

É importante ressaltar que, para um sistema simples, com apenas 2 poços de bombeamento instalados, e em pluma de pequena dimensão, o MGO apontou pra uma solução que se implantada poderia ter significado a economia de cerca de R\$1 milhão.

A partir dos pontos acima descritos, podem-se apontar as seguintes vantagens para a utilização do MGO:

- Avaliação de um número muito maior de combinações de vazões, de forma mais eficiente que o método de busca de solução por tentativa e erro; e
- O processo de especificação matemática de uma função objetivo e um número de restrições são necessários para a otimização de transporte, e este processo, normalmente não realizado durante o processo de tentativa e erro,

força a definição de objetivos e estratégias a serem consideradas e comparadas.

Devido a ser mais automatizado do que o método de tentativa e erro, o processo de otimização de transporte é menos imparcial na seleção de vazões e localização de poços.

Considerando o trabalho realizado e a experiência adquirida, para modelagem matemática de fluxo e transporte de contaminantes associada com o uso de rotina otimizadora, recomenda-se:

a) Obter parâmetros iniciais de entrada do modelo de fontes confiáveis e a partir de ensaios de campo de forma a serem representativos;

b) Além de calibrar o modelo sempre comparar a situação calculada com a esperada em campo; e

c) independente do tamanho da pluma ou do sistema de bombeamento a ser adotado, quanto houver modelagem matemática de fluxo e transporte que considerem MODFLOW 96 e MT3DMS, considerar as etapas de definição de objetivos e estratégias e aplicação de rotina otimizadora.

Com a disponibilidade de recursos computacionais que satisfazem adequadamente a utilização dessa ferramenta, e com o ganho de qualidade na decisão a ser tomada, o que implica na economia de recursos a serem aplicados na etapa de remediação, a aplicação do MGO, quando possível, sempre deve ser considerada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CETESB. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. DECISÃO DE DIRETORIA Nº 195-2005- E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências. São Paulo, 2005.

_____. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Relação de áreas contaminadas, Novembro de 2007. (http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.asp).

GUIGUER, N. e FRANZ, T. Visual Modflow: User's Manual. Waterloo, ON: Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2003.

McDONALD, M.G. e HARBAUGH A.W. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey. Book 6, Chapter A1. National Center, Reston, VA. [MODFLOW]. 1988

MEHL, S.W. e HILL, M.C.: MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-water Mode – User guide to The Link – AMG (LMG) Package for Solving Matrix Equations Using an Algebraic Multigrid Solver. U.S. Geological Survey Open File Report 01-177. 2001.

POLLOCK, D. W. Documentation of Computer Programs to Complete and Display Pathlines Using Results from the D.S. Geological Survey Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Model. U.S. Geological Survey, Open File Report 89-381. Reston, V A [MODPATH]. 1989.

_____. User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. Reston: Virginia. U. S. Geological Survey.1994 /Open-File Report 94-464. 1994.

U.S. ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY. Cleaning Up the Nation's Waste Sites: markets and Technology Trends. 2004 Edition. Solid Waste and Emergency Response (5G203P). EPA-542-R-04-15. September 2004.

ZHENG, C. MT3D1.1: A Modular Three-Dimensional Multi- species Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems - Software documentation. Ada, Oklahoma: U.S.E.P.A, Report. 1990.

ZHENG, C. e WANG, P. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multi- species Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems - Documentation and User's Guide. Vicksburg, Mississippi: U. S. Army Corps of Engineers, U. S. Army Engineer Research and Development Center. 1999. /SERDP-99-1/.

_____. A Modular Groundwater Optimizer Incorporating MODFLOW/MT3DMS. Documentation and User's Guide (DRAFT). University of Alabama in cooperation with Groundwater System Research Ltd. 2002.