

## MODELAGEM MATEMÁTICA PARA APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE *WETLANDS* NO TRATAMENTO DE AQUIFEROS LIVRES E RASOS CONTAMINADOS

*Jeane G. Santos, Ricardo Hirata e Luiz C. K. M. Ferrari*

*Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo  
São Paulo - Brasil*

**Abstract.** Wetlands are habitats where water level can be either above, beneath or at surface ground. Swamp and marsh are examples of natural wetlands, however, there are also the manmade ones, generally constructed for environmental purposes. Possible scenarios of artificial wetland application for contaminant plume attenuation in shallow aquifers were created by means of numerical modeling, using the code Visual Modflow. A comparison between three superficial flows systems shows that the drained volume varies with the reverse of residence time of water in channel and both are controlled by hydraulic conductivity of the aquifer. In simulations using 250mm/y of recharge, the residence time was smaller than the ones obtained with no recharge simulations. The horizontal dimension of captured plume can be enlarged with the construction of an impermeable funnel barrier in the entrance of the wetland. However, inserting vertical barriers, at least 4m below the wetland entrance, the results were not so effective. Modeling results indicated viability of using Visual Modflow to simulate wetlands. This simulation shown restriction to treat large volume of contaminated groundwater. A system, which is capable to treat 16m<sup>3</sup>/day of groundwater, needs to have an area of 2000m<sup>2</sup>.

**Resumo.** *Wetlands* são habitats cujo nível d'água encontra-se imediatamente abaixo, acima ou ao nível do solo. Exemplos de *wetlands* naturais são pântanos e brejos. Há também as artificiais, geralmente construídas com propósitos ambientais. Possíveis cenários de aplicação de *wetlands* na atenuação de plumas contaminantes em aquíferos rasos foram criados utilizando-se o software *Visual Modflow*. Uma comparação entre três sistemas de fluxo superficial mostrou que o volume de água que atravessa a *wetland* varia inversamente com o tempo de residência da água no canal e ambos são controlados pela condutividade hidráulica do aquífero. Em simulações com recarga de 250mm/ano, os tempos foram menores que aqueles obtidos nas simulações sem recarga. A dimensão horizontal da pluma capturada aumentou com a construção de barreiras na forma de funil, usadas para alargar a abertura permeável da *wetland*. Já a inserção de barreiras verticais, de até 4m abaixo da abertura permeável, para aumentar a profundidade de captura, não se mostrou efetiva. Os resultados apontaram a viabilidade do uso do *Visual Modflow* para a criação de *wetlands*. Porém, a utilização desses sistemas para capturar água subterrânea sem o auxílio de bombeamento foi pouco efetiva. Um sistema capaz de tratar 16m<sup>3</sup>/dia de água teve uma área de 2000m<sup>2</sup>.

**Keywords:** Wetland, numerical modeling, remediation, shallow aquifer.

### INTRODUÇÃO

Os aquíferos rasos são muito suscetíveis à contaminação, tanto por compostos orgânicos quanto por microorganismos patogênicos. Isto ocorre devido à zona não-saturada, incluindo a camada de solo, ser pouco espessa, diminuindo a capacidade de atenuação de contaminantes.

Um dos métodos utilizados, principalmente em países desenvolvidos, para o tratamento de águas contaminadas, tanto subterrânea quanto superficial, é o sistema de *wetlands*. Este tipo de *habitat* pode ocorrer naturalmente ou ser criado artificialmente, e é caracterizado por ecossistemas que ficam parcial ou totalmente inundados durante o ano. Suas características e propriedades variam conforme a geologia, geomorfologia e condições climáticas da área considerada.

O primeiro sistema de *wetland* artificial utilizado para tratamento de água superficial no Brasil foi construído por Salati *et al.* (1982 in Salati *et al.* 1998), próximo ao rio Piracicamirim,

no município de Piracicaba (SP). Desde então, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas na tentativa de aumentar a eficiência das *wetlands* e reduzir os investimentos na despoluição de águas.

*Wetlands* artificiais têm sido largamente empregadas na remediação de águas superficiais contaminadas, sendo ainda pouco avaliada em casos de atenuação de plumas contaminantes em águas subterrâneas. Nestes casos a água é normalmente bombeada para dentro de um lago, onde o ambiente químico gerado, juntamente com plantas aquáticas comuns para esses sistemas, promove a remoção dos contaminantes, principalmente por processos de transformação química e adsorção.

Devido ao baixo custo de operação e à facilidade de implantação, a hipótese de utilização de sistemas de *wetlands* artificiais no tratamento de água subterrânea, principalmente em áreas habitadas por população de baixa renda, que eventualmente utiliza fossas negras e sépticas para eliminação do seu esgoto, insinua-se como uma alternativa interessante, ainda não devidamente estudada.



Alguns autores utilizaram a modelagem matemática na verificação da interação de *wetlands* naturais e artificiais com a água subterrânea (Hensel & Miller 1991, Bradley 1996, Restrepo *et al.* 1998). Neste trabalho testou-se a possibilidade de empregarem-se *wetlands* construídas na remoção de contaminantes de aquíferos rasos livres, através da criação de diferentes modelos numéricos.

A equação de água subterrânea relacionada a cada um dos modelos foi resolvida com o uso do programa computacional Visual Modflow da Waterloo Hydrogeologic Inc. (Guiguer & Franz 1996), para um regime estacionário de fluxo, obtendo-se assim a distribuição de cargas e respectivo fluxo de água subterrânea na região modelada.

## MODELOS MATEMÁTICOS CRIADOS

### Descrição dos modelos

Foram produzidos quatro modelos distintos - M1, M2, M3 (comparados entre si) e M4 (independente dos outros três) - que simulam a porção *R* de um aquífero, cujas dimensões, nas coordenadas *X* (largura), *Y* (comprimento) e *Z* (profundidade) e os números de linhas, colunas e camadas matemáticas (*layers*) estão descritos na Tabela 1 e representados nas Figuras 1 e 2.

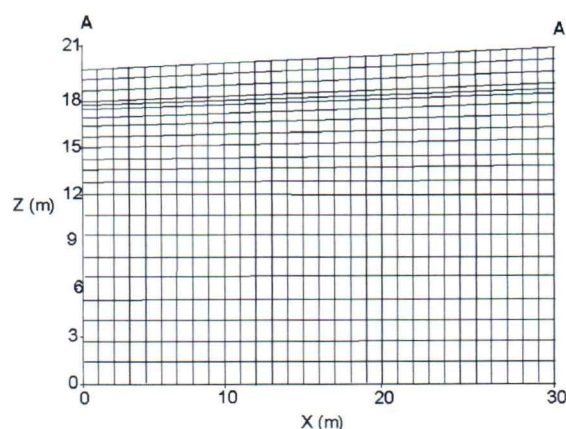
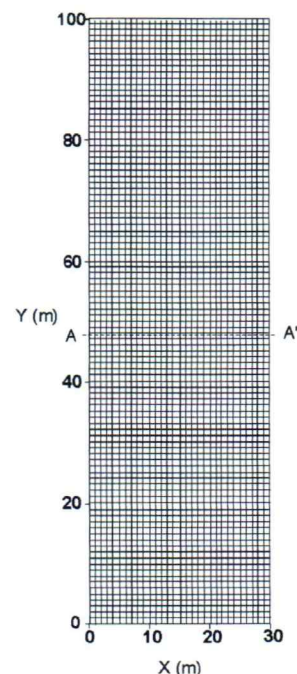
A eficiência dos modelos M1, M2 e M3 na captura da água subterrânea e sua permanência dentro do sistema foram medidas através dos fatores:

- $t_{\text{trânsito}}$  - o tempo que a água permanece no interior do sistema (dias);
- $P_{\text{captura}}$  - a maior profundidade que um tubo de fluxo que penetra o sistema pode atingir antes de ser capturado (m);
- $L_{\text{captura}}$  - a maior largura de captura de uma pluma que a *wetland* consegue capturar (m); e
- $Q_{\text{dreno}}$  - o volume de água que deixa a cavidade após ter permanecido nela por um intervalo de tempo suficiente para a remoção da contaminação ( $\text{m}^3/\text{dia}$ ).

Essas características foram obtidas com a inserção de partículas nas aberturas permeáveis das cavidades e pelo balanço de massa calculado pelo módulo ZBUD do Visual Modflow. As partículas caminham por advecção e agem como traçadores do fluxo de água subterrânea, sendo possível, através das suas trajetórias, determinar a geometria dos tubos de fluxo.

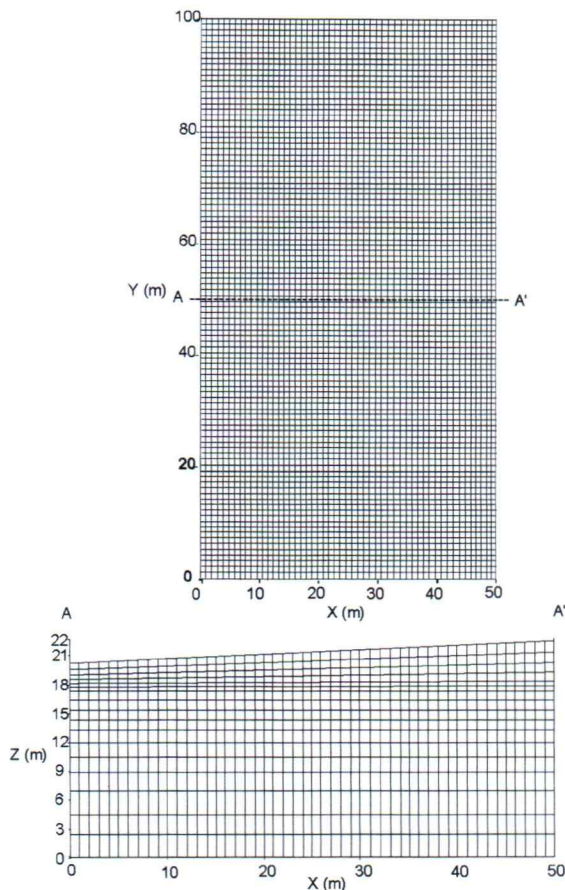
**Tabela 1** - Características geométricas da porção *P* do aquífero para cada.

Modelo	M1	M2	M3	M4
Região <i>R</i>	X (m)	30	30	30
	Y (m)	100	100	100
	Z (m)	20-21	20-21	20-22
Linhas	100	100	100	100
Colunas	30	30	30	50
Camadas	22	22	22	17



**Figura 1** - Geometria da porção *R* dos modelos M1, M2 e M3 (planta e perfil A-A').





**Figura 2** - Características geométricas da porção R do modelo M4 (planta e perfil A-A').

Devido às limitações do programa, o interior de cada canal foi definido como uma região de condutividade hidráulica de 1m/s e porosidade de 0,95 (Kadlec & Knight 1996). Já o material do volume R (aquífero), tomado como homogêneo e isotrópico quanto às propriedades hidráulicas, foi associado a uma porosidade de 0,15 e a uma condutividade  $K_{\text{terreno}}$ .

Na região de saída da água da cavidade estabeleceu-se um dreno D de alta condutância ( $1000\text{m}^2/\text{dia}$ ), a uma altura  $H_i$  em relação à base de P, escolhida de modo a manter uma coluna d'água ( $H_{\text{dreno}}$ ) entre 0,3m e 1m no interior da cavidade, condição necessária para manter as plantas ali existentes.

O fundo e as paredes de cada canal foram associados a uma baixa condutividade hidráulica ( $1 \times 10^{-10}$  m/s), exceto em uma pequena janela J de 10m de largura, para condicionar o trajeto da água para dentro da cavidade.

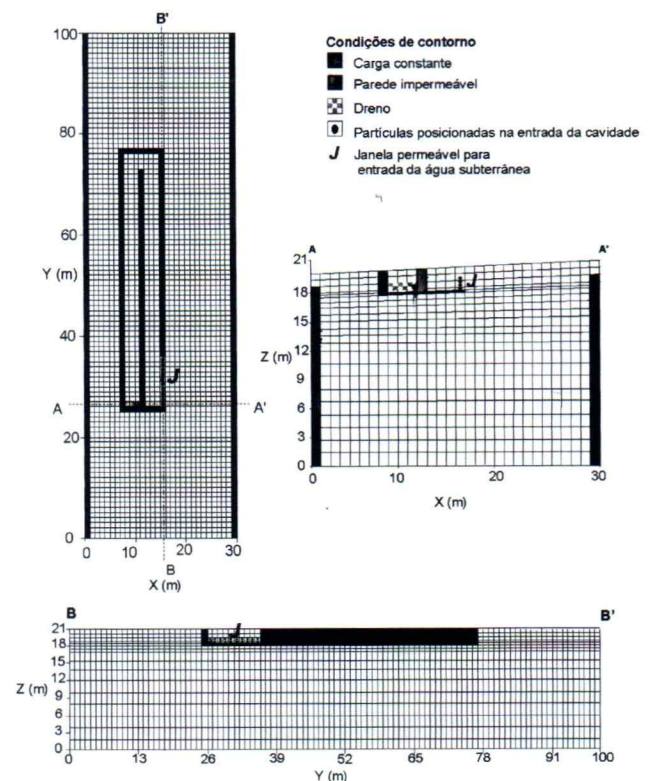
O modelo M1 (Figura 3) foi construído de acordo com as características gerais de uma *wetland* de fluxo superficial. Nos modelos M2 e M3, que são uma variação de M1, construiu-se

uma barreira em forma de cone (Figuras 4 e 5) para aumentar horizontalmente a abertura J. Uma barreira impermeável também foi inserida imediatamente abaixo da janela J, estendendo-se até 2m (M2) e 4m (M3) de profundidade, além do fundo do canal escavado. O objetivo dessa inclusão foi testar a influência dessas barreiras no aumento da eficiência da cavidade em capturar água subterrânea.

Como os resultados dessa comparação não foram satisfatórios para a relação volume de água tratada e tempo de residência, criou-se o modelo M4 (Figura 6), que simulou um sistema integrado de *wetlands*, considerado mais efetivo no tratamento de águas contaminadas por mais de um composto (Tchobanoglous 1993). Esse sistema foi formado por uma *wetland* de fluxo superficial seguida de células de fluxo subsuperficial com solo filtrante. As dimensões de M4 foram resultado da busca por  $Q_{\text{dreno}} \geq 10\text{m}^3/\text{dia}$  e  $t_{\text{transito}}$  entre 10 e 15 dias.

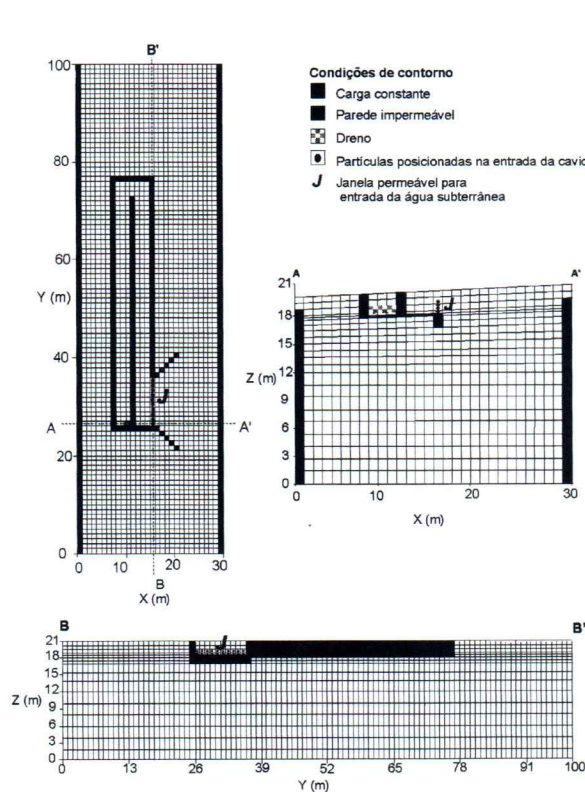
As características hidráulicas e geométricas dos modelos, em regime estacionário de cargas, estão sumarizadas na Tabela 2.

Para cada um dos modelos foram empregadas combinações distintas dos parâmetros  $K_{\text{terreno}}$  e  $H_{\text{dreno}}$ . Os valores de condutividade utilizados variam de material siltoso ( $1 \times 10^{-6}$  m/s) a arenoso ( $1 \times 10^{-3}$  m/s) (Freeze & Cherry 1979).

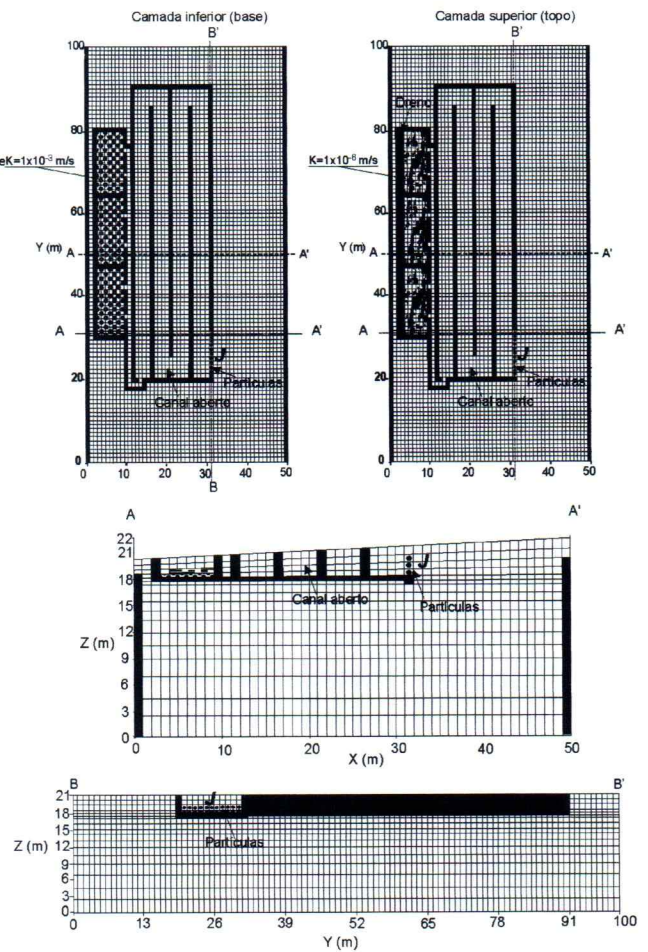


**Figura 3** - Geometria e características hidráulicas do modelo M1 (planta, perfil A-A', perfil B-B').

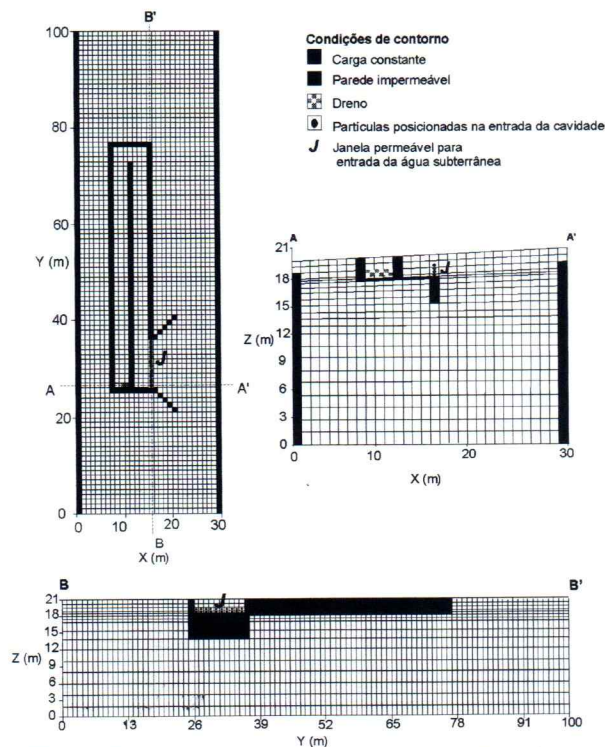




**Figura 4 - Geometria e características hidráulicas do modelo M2 (planta, perfil A-A', perfil B-B').**



**Figura 6 - Geometria e características hidráulicas do modelo M4 (planta, perfil A-A', perfil B-B').**



**Figura 5 - Geometria e características hidráulicas do modelo M3 (planta, perfil A-A', perfil B-B').**



**Tabela 2** - Características geométricas e hidráulicas dos modelos criados.

Modelo	Tipo de <i>wetland</i> simulada	Forma geométrica	Dimensões (m)	K canal escavado (m/s)
M1	SFS	Semelhante a um $\cap$	100 x 3	1
M2	SFS	Semelhante a um $\cap$ , com barreira horizontal em forma de cone na janela ( <i>J</i> ) e barreira vertical de 2 m de profundidade logo abaixo de <i>J</i> .	100 x 3	1
M3	SFS	Semelhante a um $\cap$ , com barreira horizontal em forma de cone na janela ( <i>J</i> ) e barreira vertical de 4 m de profundidade logo abaixo de <i>J</i> .	100 x 3	1
M4	SFS + SFSS	FS - semelhante a um M, com barreira vertical de 1 m de profundidade logo abaixo da janela <i>J</i> .	280 x 4	1
		Retangulares, dispostos em paralelo	17 x 6	$1 \times 10^{-3}$ (base) $5 \times 10^{-6}$ (topo)

SFS - Sistema de fluxo superficial

SFSS - sistema de fluxo subsuperficial

*J* - abertura permeável de 10 m de largura, para permitir a entrada da água subterrânea na *wetland*.

### Confiabilidade dos resultados

Como os modelos simulados não foram calibrados, por serem hipotéticos, observou-se a porcentagem de discrepância entre o volume de água que entrava ( $Q_{\text{entrada}}$ ) e o que saía ( $Q_{\text{saída}}$ ) da porção *R* do aquífero. Os resultados foram todos inferiores a 0,51%, indicando a representatividade dos resultados.

O volume de água que entrou em *R* não se alterou nas situações sem recarga e com recarga. Já o volume de água drenado foi de 5 a 9% maior para as simulações com recarga, para condutividade de  $1 \times 10^{-6}$  m/s.

As variações de  $Q_{\text{dreno}}$  e  $Q_{\text{entrada}}$  foram praticamente idênticas para os modelos M1, M2 e M3, e só não foram lineares nos casos de  $H_{\text{dreno}} = 1$  m e na situação de recarga para condutividade hidráulica ( $K_{\text{terreno}}$ ) de  $1 \times 10^{-6}$  m/s.

A porcentagem de  $Q_{\text{dreno}}/Q_{\text{entrada}}$  permaneceu na ordem de 1 a 2% para meios de alto  $K_{\text{terreno}}$  ( $1 \times 10^{-3}$  m/s), quer se utilizasse ou não de recarga. Nos casos intermediários de  $K_{\text{terreno}}$  ( $1 \times 10^{-5}$  e  $1 \times 10^{-4}$  m/s), a diferença entre as simulações sem recarga e com recarga não chegou a 1% em cada um dos três modelos.

Os modelos M1, M2 e M3 tiveram um tempo de processamento de cerca de 1 minuto para cada uma das simulações. M4 demorava cerca de 5 minutos para ser processado, utilizando-se um processador Celeron 400MHz.

### Resultados das simulações matemáticas

Para os modelos M1, M2 e M3, as simulações foram divididas em dois grupos: sem recarga e com recarga de 250mm/ano. As Figuras 7 a 9 apresentam o resultado para cada um desses três modelos. Essas

figuras correspondem ao melhor resultado obtido para cada simulação, considerando-se um tempo de residência dentro do intervalo de 3 e 20 dias.

Largura, profundidade da pluma e tempo de residência foram medidos através do caminhamento de partículas colocadas na janela permeável (*J*) do canal e processadas pelo módulo Modpath. Devido à posição das partículas, suas trajetórias foram simuladas para frente (*forward*) e para trás (*backward*), cujos resultados estão representados pelas variações semelhantes de cores nas Figuras 7 a 9. O caminhamento para frente foi utilizado para medir os tempos mínimo e máximo de permanência da água dentro da *wetland*. O caminhamento para trás serviu para auxiliar na medição da profundidade e largura de captura de uma possível pluma contaminante.

O volume de água tratado, obtido através do balanço de massas realizado pelo módulo ZBUD, correspondeu à quantidade de água que passou pelos drenos posicionados nas saídas dos canais. As alturas dos drenos variaram de modo a manter colunas d'água de 1m, 0,75m, 0,5m e 0,3m dentro do canal dos modelos M1, M2 e M3.

Para cada altura de dreno foram realizadas simulações variando-se a condutividade hidráulica do aquífero ( $K_{\text{terreno}}$ ) que circunda a *wetland* em  $1 \times 10^{-6}$  m/s,  $1 \times 10^{-5}$  m/s,  $1 \times 10^{-4}$  m/s e  $1 \times 10^{-3}$  m/s.

Uma vez que os resultados de M1, M2 e M3 não apresentaram uma eficiência satisfatória, na tentativa de se obter como resultado uma vazão de dreno superior a  $10 \text{ m}^3/\text{dia}$ , para um tempo de trânsito entre 10 e 15 dias, foi construído o modelo M4. A geometria do modelo foi ajustada com o objetivo de atingir o melhor resultado dentro dos limites imposto, o qual foi alcançado com uma  $Q_{\text{dreno}}$  de  $16,28 \text{ m}^3/\text{dia}$  e um  $t_{\text{trânsito}}$  mínimo de 10 dias e máximo de 12 dias, para um  $H_{\text{dreno}}$  de 0,9m nas



saídas dos canais de fluxo subsuperficial e  $K_{\text{terreno}}$  igual a  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ .

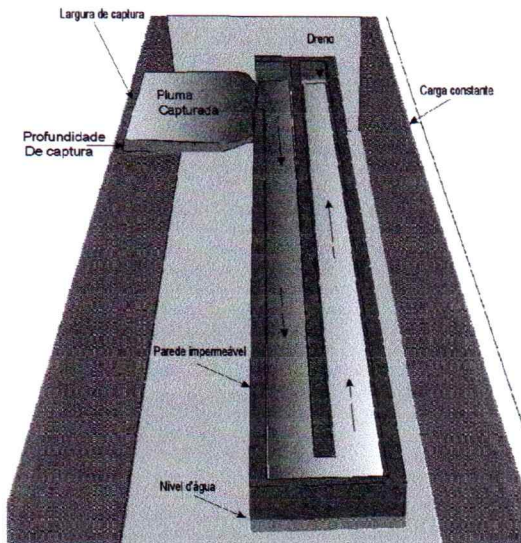


Figura 7 - Exemplo de resultado para o modelo M1.

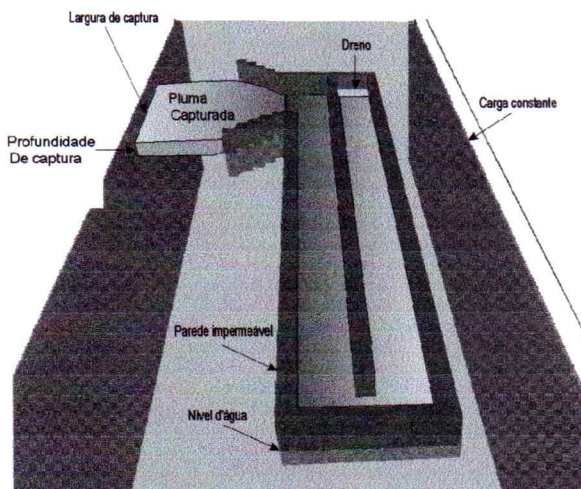


Figura 8 - Exemplo de resultado para o modelo M2.

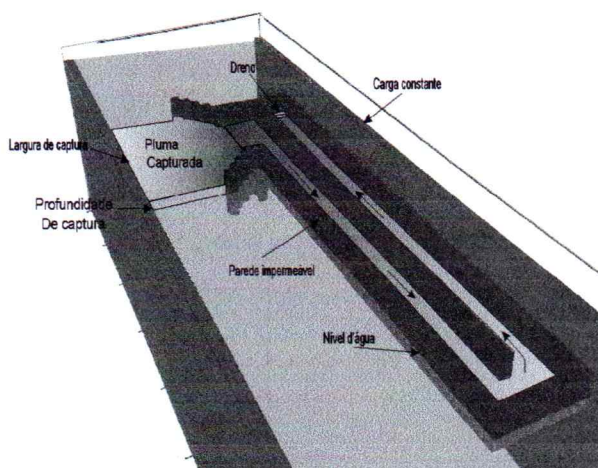


Figura 9 - Exemplo de resultado para o modelo M3.

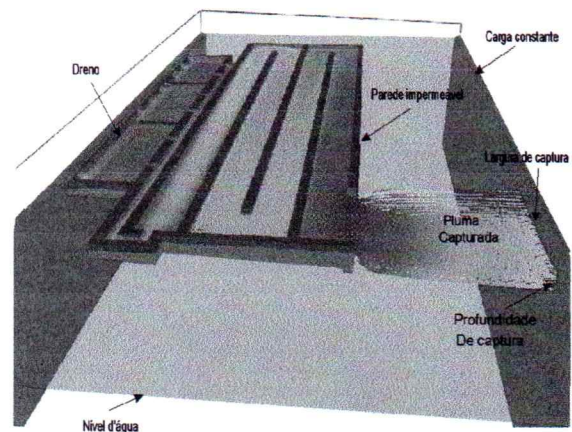


Figura 10 – Exemplo de resultado para o modelo M4.

### Volume de água tratada x tempo de residência

Na comparação entre M1, M2 e M3, o volume de água drenado ( $Q_{\text{dreno}}$ ) e o tempo de trânsito das partículas dentro do canal ( $t_{\text{trânsito}}$ ) foram inversamente proporcionais e controlados pela condutividade hidráulica da região ( $K_{\text{terreno}}$ ), conforme ilustrado nas Figuras 11 e 12. Estas relações foram também avaliadas de acordo com as quatro alturas do dreno ( $H_{\text{dreno}}$ ) dentro do canal. As curvas dos resultados  $Q_{\text{dreno}}$  e  $t_{\text{trânsito}}$  máximo como funções de  $K_{\text{terreno}}$  (para diferentes  $H_{\text{dreno}}$ ) ilustram como este fator governa aqueles dois parâmetros.

$H_{\text{dreno}}$  também influenciou  $Q_{\text{dreno}}$  e  $t_{\text{trânsito}}$ : quanto menor a coluna d'água dentro da *wetland*, menor o tempo de trânsito e maior o volume de água que passa pelo dreno (Tabelas 4 e 5), devido ao maior gradiente hidráulico.

Neste trabalho considerou-se como ideal  $t_{\text{trânsito}}$  entre 3 e 20 dias. Os melhores resultados foram obtidos admitindo-se valores de  $K_{\text{terreno}}$  iguais a  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  e  $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  (Tabela 3). Os tempos mínimo e máximo determinados ficaram, geralmente, dentro do intervalo mencionado, e corresponderam àqueles em que a primeira e última partículas atingiram o dreno, respectivamente. Observou-se que para  $K_{\text{terreno}}$  igual a  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , o intervalo de tempo foi superior a 20 dias, e inferior a um dia para  $K_{\text{terreno}}$  de  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ . Nas simulações com recarga o intervalo de  $t_{\text{trânsito}}$  das partículas diminuiu, principalmente quando se utilizou  $K_{\text{terreno}}$  igual a  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ .

Os valores de  $Q_{\text{dreno}}$  obtidos foram de 1,62 a  $9,81 \text{ m}^3/\text{dia}$ , considerando o intervalo de  $t_{\text{trânsito}}$  entre 3 e 20 dias (Tabela 4). O melhor resultado entre os três modelos está relacionado ao M3 ( $9,81 \text{ m}^3/\text{dia}$ ), adotando-se  $H_{\text{dreno}} = 1 \text{ m}$  e  $K_{\text{terreno}}$  de  $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ . O intervalo  $t_{\text{trânsito}}$  retornou valores de 4 a 5 dias.



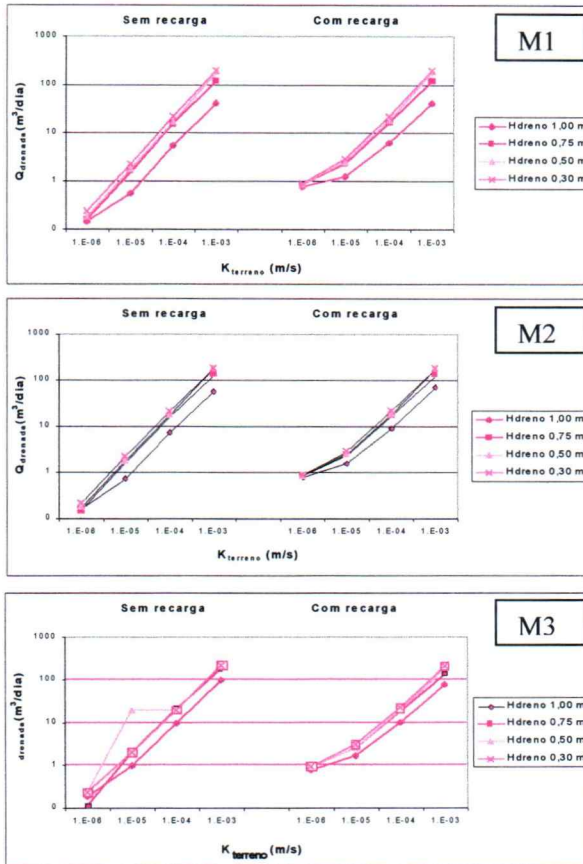


Figura 11 – Volume da água drenada para os modelos M1, M2 e M3.

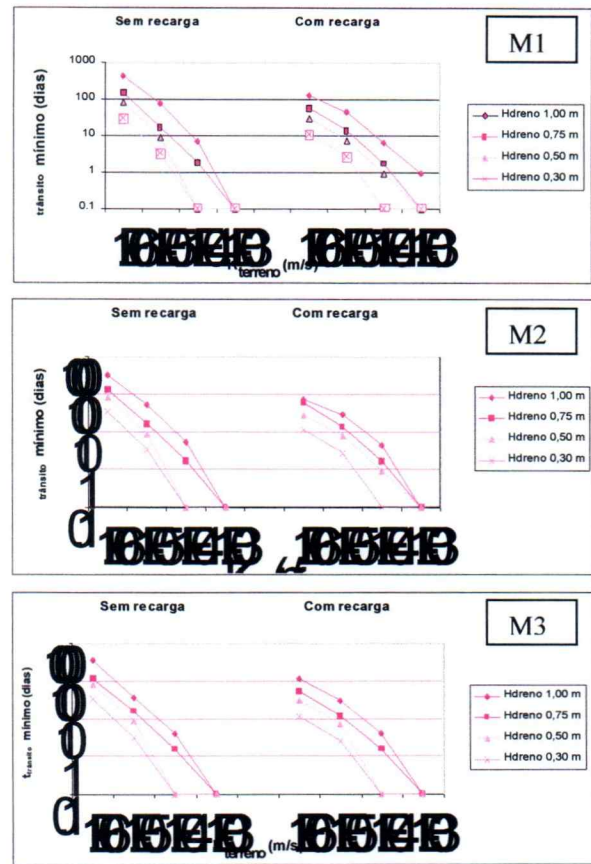


Figura 12 – Tempo de trânsito para os modelos M1, M2 e M3.

Tabela 3 - Variação no tempo de trânsito das partículas dentro do canal escavado para M1, M2 e M3.

H <sub>dreno</sub> (m)	K <sub>terreno</sub> (m/s)	Modelo					
		M1		M2		M3	
		t <sub>transito</sub> (dias)		t <sub>transito</sub> (dias)		t <sub>transito</sub> (dias)	
		Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga
1,00	1 x 10 <sup>-6</sup>	421 a 600	122 a 170	317 a 430	72,0 a 120	351 a 452	112 a 170
	1 x 10 <sup>-5</sup>	74,7 a 97,0	42,6 a 63,0	50,2 a 65,5	29,8 a 35,0	36,2 a 48,5	28,1 a 48,0
	1 x 10 <sup>-4</sup>	6,90 a 10,5	6,44 a 9,50	5,07 a 7,50	4,21 a 4,90	4,00 a 5,00	3,82 a 5,80
	1 x 10 <sup>-3</sup>	< 1,00	0,91 a 1,20	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
0,75	1 x 10 <sup>-6</sup>	140 a 205	57,7 a 94,0	126 a 160	58,0 a 92,0	115 a 172	51,5 a 84,0
	1 x 10 <sup>-5</sup>	17,2 a 23,0	13,7 a 21,0	15,9 a 20,0	13,0 a 19,7	14,9 a 19,0	11,9 a 16,5
	1 x 10 <sup>-4</sup>	1,73 a 2,40	1,69 a 2,50	1,65 a 2,30	1,62 a 2,40	1,50 a 2,20	1,50 a 2,10
	1 x 10 <sup>-3</sup>	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
0,50	1 x 10 <sup>-6</sup>	79,0 a 100	29,5 a 46,5	82,5 a 100	28,0 a 41,0	80,3 a 104	30,2 a 53,0
	1 x 10 <sup>-5</sup>	8,94 a 13,0	7,26 a 10,0	8,53 a 11,0	7,27 a 9,60	8,30 a 11,0	6,95 a 9,20
	1 x 10 <sup>-4</sup>	< 1,00	0,91 a 1,30	< 1,00	0,90 a 1,30	< 1,00	< 1,00
	1 x 10 <sup>-3</sup>	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
0,30	1 x 10 <sup>-6</sup>	29,7 a 37,0	11,0 a 16,3	32,3 a 40,0	11,1 a 15,5	32,2 a 46,0	11,0 a 16,3
	1 x 10 <sup>-5</sup>	3,14 a 4,00	2,61 a 3,30	3,15 a 4,00	2,64 a 3,50	3,08 a 4,30	2,57 a 3,50
	1 x 10 <sup>-4</sup>	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
	1 x 10 <sup>-3</sup>	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00

H<sub>dreno</sub> = coluna d'água no interior do canal  
T<sub>transito</sub> = tempo de trânsito

K<sub>terreno</sub> = condutividade hidráulica do terreno



**Tabela 4 - Variação na vazão drenada para M1, M2 e M3.**

H <sub>dreno</sub> (m)	K <sub>terreno</sub> (m/s)	Modelo					
		M1		M2		M3	
		Q <sub>dreno</sub> (m <sup>3</sup> /dia)		Q <sub>dreno</sub> (m <sup>3</sup> /dia)		Q <sub>dreno</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	
		Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga
1,00	1 x 10 <sup>-6</sup>	0,14	0,73	0,16	0,76	0,18	0,76
	1 x 10 <sup>-5</sup>	0,54	1,21	0,74	1,53	0,92	1,60
	1 x 10 <sup>-4</sup>	5,25	5,90	7,22	9,09	9,10	9,81
	1 x 10 <sup>-3</sup>	43,0	41,0	57,7	71,7	98,7	74,2
0,75	1 x 10 <sup>-6</sup>	0,15	8,82	0,15	0,82	0,11	8,85
	1 x 10 <sup>-5</sup>	1,48	2,15	1,62	2,29	1,93	2,44
	1 x 10 <sup>-4</sup>	15,5	15,7	15,8	16,4	20,5	17,8
	1 x 10 <sup>-3</sup>	117	118	126	127	178	135
0,50	1 x 10 <sup>-6</sup>	0,17	0,83	0,17	0,84	0,23	0,84
	1 x 10 <sup>-5</sup>	1,68	2,35	1,78	2,36	1,93	2,46
	1 x 10 <sup>-4</sup>	16,9	17,5	17,2	17,8	19,5	18,9
	1 x 10 <sup>-3</sup>	177	178	179	180	216	193
0,30	1 x 10 <sup>-6</sup>	0,23	0,88	0,21	0,88	0,23	0,90
	1 x 10 <sup>-5</sup>	2,18	2,87	2,19	2,86	1,93	2,93
	1 x 10 <sup>-4</sup>	21,9	21,7	20,7	21,4	19,5	22,2
	1 x 10 <sup>-3</sup>	190	191	176	180	216	204

H<sub>dreno</sub> = coluna d'água no interior do canal  
Q<sub>dreno</sub> = vazão do dreno

K<sub>terreno</sub> = condutividade hidráulica do terreno

### Dimensões das plumas capturadas

As profundidades de captura das partículas (P<sub>captura</sub>) nos modelos M1, M2 e M3 variaram de 0,7 a 4,0m nas simulações sem recarga e de 0,2 a 3,6m com recarga (Tabela 5).

Os resultados (Figura 14) mostraram que P<sub>captura</sub> foi maior para H<sub>dreno</sub>=0,3m e menor quando H<sub>dreno</sub>=1m para os três modelos. A diferença nas profundidades foi de 1,5m considerando que houve recarga, para o modelo M3, que utilizou uma barreira impermeável de 4m abaixo da janela J da *wetland*, e 2,9m quando a recarga foi nula, para M1, que não continha barreira.

Comparando-se as curvas para as quatro alturas de dreno para M1, M2 e M3, observou-se que a P<sub>captura</sub> máxima foi atingida em M3, cuja barreira foi mais efetiva que aquela colocada no modelo M2, com profundidade de 2m (Figura 5).

Analisando-se o comportamento dessas curvas, notou-se que na ausência de recarga, não houve evidência de que a profundidade dependesse da

condutividade hidráulica, dada a pequena variação nos valores de P<sub>captura</sub> nos três modelos. Este comportamento, em situação de recarga, foi de modo geral diferente, com as curvas apresentando uma tendência em arco.

Em relação às larguras horizontais de captura das partículas (L<sub>captura</sub>), os valores foram de 12,30m a 17,40m, conforme a Tabela 6. De acordo com os valores desta tabela e os gráficos da Figura 15, os melhores resultados foram para H<sub>dreno</sub> = 0,75m e os piores para H<sub>dreno</sub> = 1m. A largura de captura aumentou com a inserção da barreira em forma de cone (M2 e M3), mostrando que esta barreira foi mais efetiva que a vertical, descrita no item anterior, pois aumentou L<sub>captura</sub> entre 2m e 4m. Não foram observados efeitos significativos da recarga neste parâmetro.

Também as variações com a mudança de condutividade hidráulica para cada H<sub>dreno</sub> não foram superiores a 1m (M1). Em M2 e M3 os valores foram bem próximos para os diferentes H<sub>drenos</sub>.



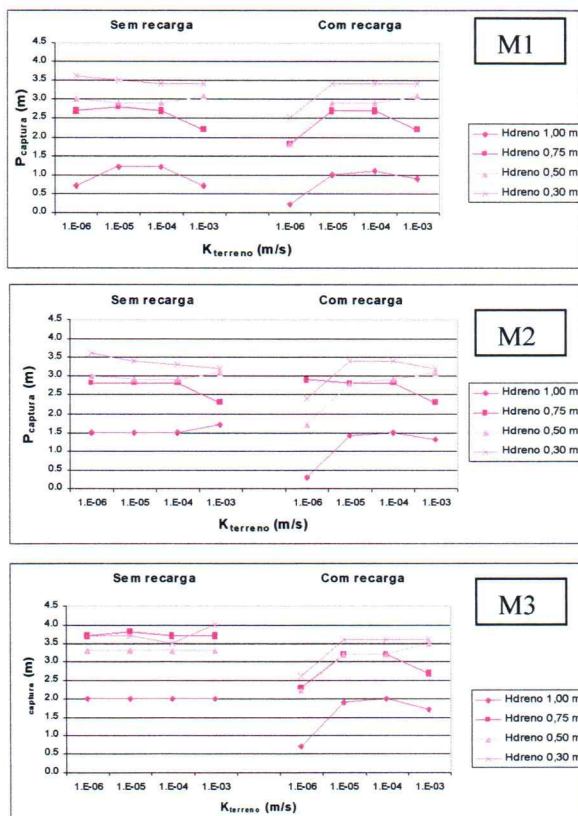


Figura 14 - Profundidades de captura das partículas para os modelos M1, M2 e M3.

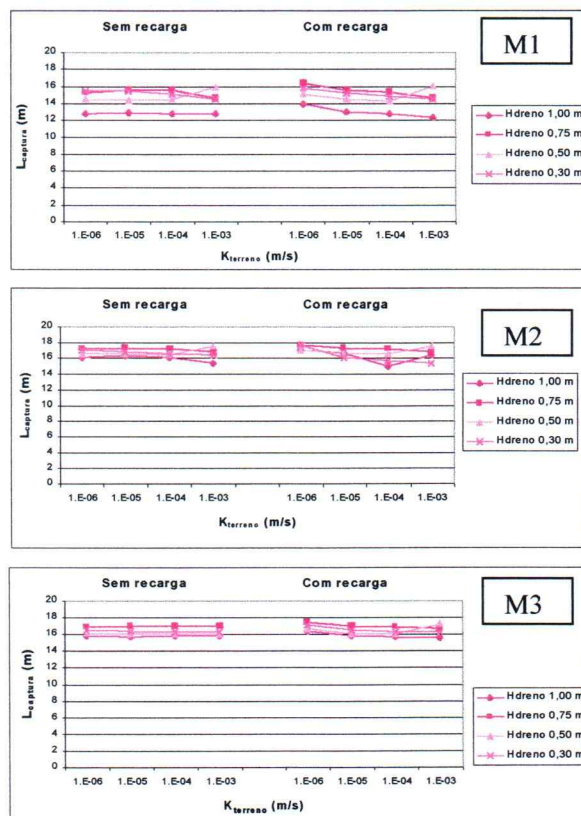


Figura 15 - Largura de captura das partículas para os modelos M1, M2 e M3.

Tabela 5 - Variação na profundidade de captura das partículas para M1, M2 e M3.

H <sub>dreno</sub> (m)	K <sub>terreno</sub> (m/s)	Modelo					
		M1		M2		M3	
		P <sub>captura</sub> (m)		P <sub>captura</sub> (m)		P <sub>captura</sub> (m)	
		Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga
1,00	1 x 10 <sup>-6</sup>	0,70	0,20	1,50	0,30	2,00	0,70
	1 x 10 <sup>-5</sup>	1,20	1,00	1,50	1,40	2,00	1,90
	1 x 10 <sup>-4</sup>	1,20	1,10	1,50	1,50	2,00	2,00
	1 x 10 <sup>-3</sup>	0,70	0,90	1,70	1,30	2,00	1,70
0,75	1 x 10 <sup>-6</sup>	2,70	1,80	2,80	2,90	3,70	2,30
	1 x 10 <sup>-5</sup>	2,80	2,70	2,80	2,80	3,80	3,20
	1 x 10 <sup>-4</sup>	2,70	2,70	2,80	2,80	3,70	3,20
	1 x 10 <sup>-3</sup>	2,20	2,20	2,30	2,30	3,70	2,70
0,50	1 x 10 <sup>-6</sup>	3,00	1,80	3,00	1,70	3,30	2,20
	1 x 10 <sup>-5</sup>	2,90	2,90	2,90	2,80	3,30	3,20
	1 x 10 <sup>-4</sup>	2,90	2,90	2,90	2,90	3,30	3,20
	1 x 10 <sup>-3</sup>	3,10	3,10	3,10	3,10	3,30	3,50
0,30	1 x 10 <sup>-6</sup>	3,60	2,50	3,60	2,40	3,70	2,60
	1 x 10 <sup>-5</sup>	3,50	3,40	3,40	3,40	3,70	3,60
	1 x 10 <sup>-4</sup>	3,40	3,40	3,30	3,40	3,50	3,60
	1 x 10 <sup>-3</sup>	3,40	3,40	3,20	3,20	4,00	3,60

H<sub>dreno</sub> = coluna d'água no interior do canal

K<sub>terreno</sub> = condutividade hidráulica do terreno

P<sub>captura</sub> = profundidade de captura da pluma contaminante



**Tabela 6 - Variação na largura horizontal de captura das partículas para M1, M2 e M3.**

H <sub>dreno</sub> (m)	K <sub>terreno</sub> (m/s)	Modelo					
		M1		M2		M3	
		L <sub>captura</sub> (m)		L <sub>captura</sub> (m)		L <sub>captura</sub> (m)	
		Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga	Sem recarga	Com recarga
1,00	1 x 10 <sup>-6</sup>	12,70	13,90	16,10	17,00	15,80	16,40
	1 x 10 <sup>-5</sup>	12,80	12,90	16,30	16,70	15,70	15,80
	1 x 10 <sup>-4</sup>	12,70	12,70	16,10	15,00	15,80	15,70
	1 x 10 <sup>-3</sup>	12,70	12,30	15,30	16,40	15,80	15,50
0,75	1 x 10 <sup>-6</sup>	15,20	16,30	17,20	17,10	16,80	17,40
	1 x 10 <sup>-5</sup>	15,50	15,50	17,30	17,30	17,00	17,00
	1 x 10 <sup>-4</sup>	15,50	15,30	17,10	17,20	17,00	16,90
	1 x 10 <sup>-3</sup>	14,60	14,60	16,80	16,80	17,00	16,60
0,50	1 x 10 <sup>-6</sup>	14,50	15,00	16,50	17,00	16,10	16,60
	1 x 10 <sup>-5</sup>	14,30	14,50	16,50	16,50	16,00	16,00
	1 x 10 <sup>-4</sup>	14,40	14,20	16,40	16,50	16,00	16,00
	1 x 10 <sup>-3</sup>	15,80	15,90	17,50	17,50	16,00	17,20
0,30	1 x 10 <sup>-6</sup>	15,40	15,70	17,00	17,30	16,50	17,10
	1 x 10 <sup>-5</sup>	15,40	15,20	16,80	16,00	16,40	16,50
	1 x 10 <sup>-4</sup>	15,00	14,80	16,50	15,70	16,30	16,30
	1 x 10 <sup>-3</sup>	14,50	14,40	16,40	15,30	16,20	16,20

H<sub>dreno</sub> = coluna d'água no interior do canal

K<sub>terreno</sub> = condutividade hidráulica do terreno

L<sub>captura</sub> = largura de captura da pluma contaminante

## CONCLUSÕES

A utilização do Visual Modflow para a simulação de wetlands construídas para captura de plumas contaminantes em aquíferos livres e rasos se mostrou viável. Porém, os resultados indicaram a necessidade de uma área considerável (>2000m<sup>2</sup>) para a implantação desses sistemas, para tratar água subterrânea a partir de 10m<sup>3</sup>/dia, com um tempo de residência entre 10 e 15 dias.

O volume drenado e o tempo de permanência da água dentro do canal são inversamente proporcionais e fortemente controlados pela condutividade hidráulica do terreno (K<sub>terreno</sub>), que é um fator limitante para a construção de wetland para tratar a água subterrânea. Para K<sub>terreno</sub> ≤ 1x10<sup>-6</sup>m/s, o tempo de residência seria muito longo e o volume drenado muito pequeno, inferior a 1m<sup>3</sup>/dia.

A precipitação também influencia o tempo de trânsito. Nas simulações com recarga de 250mm/ano esse tempo foi menor que nas simulações sem recarga.

A largura da pluma capturada pode ser controlada com barreiras impermeáveis para aumentar a abertura de captura da água subterrânea. Já a profundidade da pluma exige uma intervenção mais complexa, pois barreiras de até 4m além do fundo do canal, aumentariam, no máximo, até 1m a profundidade de captura da água subterrânea.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP, pelo auxílio financeiro a este trabalho e à CAPES, pela bolsa de estudos à primeira autora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bradley, C. 1996. *Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire*. Journal of Hydrology 185: p 87-114.
- Freezy, R. & Cherry, J. 1979. *Groundwater*. New Jersey, Prentice-Hall. 604p.
- Guiguer, N. & Franz, T. 1996. *Visual MODFLOW. User's manual*. Waterloo, WHI. 231p.
- Hensel, B. R. & Miller, M. V. 1991. Effects of wetlands creation on groundwater flow. Journal of Hydrology 126: p 293-314.
- Kadlec, R.H. & Knight, R.L. 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers. 893 p.
- Salati, E.; Salati E., Salati Filho, E. 1998. *Project of wetlands developed in Brazil*. 6<sup>th</sup> International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control, Águas de São Pedro, SP, Brasil. p 11-27.
- Tchobanoglous, G., 1993. *Constructed wetlands and aquatic plant systems: research, design, operational, and monitoring issues*. In: G. A. Moshiri (Ed), *Constructed wetlands for water quality improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, Ann Arbor, London, p 23-33.