

# ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO IMPACTO FLORESTAL SOBRE AQUÍFEROS

A. Leontiev<sup>1</sup>; W. Huacasi<sup>2</sup> & R. Busse<sup>1</sup>

**Resumo** – Neste trabalho é proposto um método numérico para a simulação computacional do impacto florestal sobre aquíferos. Por este fenômeno entendemos a variação do nível do lençol freático das águas subterrâneas em áreas florestais. O modelo matemático de impacto florestal inclui um problema de valor de contorno com condições de contorno livre e de contacto. Considerando este problema de contorno contacto-livre como um problema de otimização de forma resolvemos usando a discretização via elementos de contorno. Trabalhamos com as variáveis de estado e contorno livre como variáveis independentes, tratamos o problema discretizado como um problema de programação matemática não linear e aplicamos o algoritmo do ponto interior para resolvê-lo. Resultados numéricos são discutidos para um problema teste 2D ilustrativo.

**Abstract** – Here we propose a numerical method for the computer simulation of forest impact on aquifers. With this phenomenon we understand changes in the level of groundwater table beneath the areas recovered by trees. The mathematical model of the forest impact includes a boundary-value problem with free and contact boundary conditions. Considering this free-contact boundary problem as a shape optimization problem we perform boundary elements discretization. Assuming the state and free boundary variables as independents, we treat the discretized problem as a nonlinear mathematical program and apply interior point algorithm to solve it. Numerical results for an illustrative 2D test problem are discussed.

**Palavras-Chave** – Meio poroso; escoamento permanente não confinado; sucção de fluxo; otimização de forma; método dos elementos de contorno; programação matemática.

---

<sup>1</sup> Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 21945 970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: anatoli@im.ufrj.br

<sup>2</sup> Laboratório de Matemática, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 28015 620, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. E-mail: [wilma@uenf.br](mailto:wilma@uenf.br)

## INTRODUÇÃO

O impacto florestal sobre aquíferos surge do efeito do rebaixamento ou levantamento do nível do lençol freático, causado pelo desmatamento ou reflorestamento das áreas florestais. Comumente são usados métodos experimentais para estudar este fenômeno, por exemplo, ver [1,2,3]. Estes experimentos consistem em observações do lençol freático em escalas e tempo real que normalmente levam anos. Para prevenir a redução do nível, modelos de balanço hídrico são aplicados, [1].

Este trabalho propõe um método numérico para simulação computacional do impacto florestal sobre aquíferos. Desde o ponto de vista hidro-mecânico este fenômeno é um problema de escoamento não confinado em meio poroso com possível descarga (evaporação) de fluido através do lençol freático causado pela sucção das raízes das arvores. A localização do lençol freático sob a sucção florestal, as características do fluxo e a região de contato do aquífero com o sistema radicular das arvores são não conhecidos para este problema.

O modelo bidimensional do fenômeno do impacto florestal, considerado aqui, inclui um problema de valor de contorno com condições de contato e contorno livre, ver [4]. Este modelo fornece todas as componentes necessárias para a simulação numérica do impacto florestal. Uma outra alternativa e provavelmente uma aproximação mais física para modelar esta classe de problemas pode ser usando a solução de F.E.M para fluidos saturados - não saturados descrito em [5].

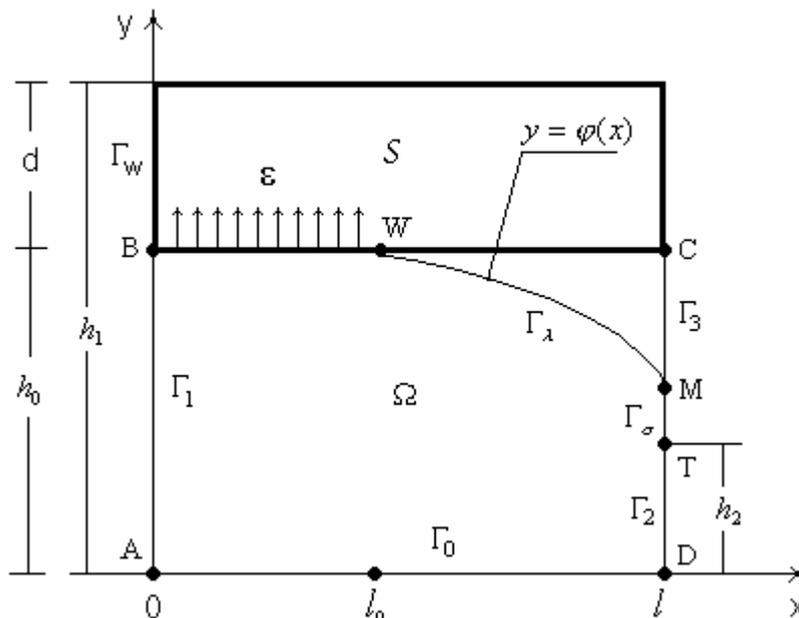
O fenômeno de escoamento permanente não confinado através de meio poroso pertence a categoria de problemas de valor de contorno livre. Uma parte do contorno do domínio do problema, chamado contorno livre, é desconhecido *a priori* e pode ser encontrado como uma componente da solução. Os problemas de escoamentos permanentes não confinados podem ser resolvidos por vários métodos tais como: analítico [6], iterativo [7] e o método de transformação de Baiocchi [8]. Todos os métodos mencionados anteriormente foram propostos para resolver o problema clássico de percolação, isto é, sem considerar quaisquer efeito de infiltração (ou evaporação) sobre o lençol freático. Para alguns problemas a solução analítica pode ser obtida uma vez que a zona de infiltração seja prescrita, [9]. Se uma similar transformação de Baiocchi é aplicada para o problema de impacto florestal isto nos conduziria a uma desigualdade quase variacional, ver [4], a qual não pode ser facilmente resolvida numericamente.

Nossa técnica para resolver o problema de impacto florestal esta baseado na aproximação de otimização de forma. A diferença dos outros métodos que envolvem análise de sensibilidade [10], consideramos a variável de estado do sistema e a variável de forma como variáveis independentes. Usando a discretização via elementos de contorno, aprontamos o problema de programação matemática: encontrar o mínimo de uma função objetivo sujeito a algumas restrições de igualdade e (ou) desigualdade. As restrições de igualdade surgem de da discretização da equação de estado e

definem a relação entre as variáveis de forma e de estado. Para resolver este problema de programação matemática não linear usamos o algoritmo do ponto interior de Herskovits, [11]. O exemplo numérico do problema de impacto florestal é mostrado e comparado com situações diferentes incluindo o problema clássico de percolação.

### FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE IMPACTO FLORESTAL

A diferença entre o problema de impacto florestal e o problema de percolação clássico, ver [6], é a ocorrência de fluxo através da superfície freática devido ao contato eventual da superfície freática com o sistema radicular. Seja  $R \equiv ABCD$  um aberto e, por conveniência, domínio retangular ocupado pelo meio poroso e  $S$  o sistema radicular de profundidade  $d > 0$ , ver Fig. 1. O fluido é assumido ideal. O meio poroso homogêneo e isotrópico com coeficiente de permeabilidade igual a um. O efeito de capilaridade do lençol freático não é considerado em nosso modelo. Assumimos que ocorre fluxo por sucção na taxa  $\varepsilon(x)$  na parte  $BW$  do lençol freático  $\Gamma_\lambda \equiv BWM$  a qual alcança o fundo  $S_0 \equiv BC$  do sistema radicular. A parede esquerda  $\Gamma_w$  de  $S$  é assumido impermeável. A área de contato entre o aquífero e o sistema radicular  $BW$  é *a priori* desconhecido e pode ser definido junto com a localização do resto do lençol freático  $WM$ , percolação  $MT$  e velocidade potencial  $u$  em  $\Omega = ABWMTD$ . Suponhamos também que a função  $\varphi(x)$  que define a porção  $\Gamma_\lambda \setminus S_0 \equiv WM$  do lençol freático é decrescente e é denotado por  $h_0 \equiv h_1 - d$ .



**Figura 1 - Problema de Impacto Florestal**

Para o problema de impacto florestal definimos nas partes  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_0$  e  $\Gamma_\sigma$  Do contorno  $\partial\Omega$  as mesmas condições como para o problema de percolação, ver [6], i.e.  $u = h_1$  sobre  $\Gamma_1$ ,  $u = h_2$  sobre  $\Gamma_2$ ,  $u = y$  sobre  $\Gamma_\sigma$ ,  $q = 0$  sobre  $\Gamma_0$ . A parte do lençol freático onde não existe contato  $S$  novamente é contorno livre. Aqui assumimos condições  $u = y$  e  $q = 0$ . Quando  $\Gamma_\lambda \cap S_0 \neq \emptyset$  temos um fluxo com taxa  $\varepsilon(x)$  que atravessa a parte do lençol freático  $\Gamma_\lambda$  ao interior de  $S$ .

Assim, obtemos a seguinte formulação matemática para o problema do impacto florestal, ver [4]:

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \text{Encontrar } \varphi(x) \text{ e } u(x, y) \text{ tal que:} \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta u = 0 \quad \text{em } \Omega, \\ u = h_1 \quad \text{sobre } \Gamma_1, \\ u = h_2 \quad \text{sobre } \Gamma_2, \\ u = y \quad \text{sobre } \Gamma_\sigma \cup (\Gamma_\lambda \setminus S_0), \\ q = 0 \quad \text{sobre } \Gamma_0 \cup (\Gamma_\lambda \setminus S_0), \\ q = -\varepsilon(x) \quad \text{sobre } \Gamma_\lambda \cap S_0. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

onde  $q \equiv \partial u / \partial n$  e  $n$  é a normal externa a  $\Gamma_0 \cup \Gamma_\lambda$ .

No lençol freático temos condições que tomam a forma de condições de contorno de contato ou livre. Chamamos estas condições de condições de contorno “contato-livre”. Enquanto o problema clássico de percolação pode ser formulado como uma desigualdade variacional, e portanto, numericamente resolvido, o problema de impacto florestal é representado por uma desigualdade quase-variacional, [4]. Esta formulação quase-variacional é usada para provar a existência e unicidade para a solução do problema (P).

Uma formulação equivalente de (P) pode ser dada em termos de otimização de forma para o sistema governado pela equação de Laplace. Seja  $\Phi$  o conjunto de todas as formas factíveis do lençol freático, formado por curvas suaves. O problema de otimização consiste em encontrar  $\psi \in \Phi$  e  $u$  tal que:

$$(P_1) \left\{ \begin{array}{l} \min_{\psi \in \Phi} (q)_{\Gamma_\lambda \setminus S_0}^2 \\ \text{onde } q = \partial u / \partial n \text{ e } u(x, y) \text{ é a solução do problema:} \\ \left\{ \begin{array}{l} \Delta u = 0 \quad \text{em } \Omega, \\ u = h_1 \quad \text{sobre } \Gamma_1, \\ u = h_2 \quad \text{sobre } \Gamma_2, \\ u = y \quad \text{sobre } \Gamma_\sigma \cup (\Gamma_\lambda \setminus S_0), \\ q = 0 \quad \text{sobre } \Gamma_0, \\ q = -\varepsilon(x) \quad \text{sobre } \Gamma_\lambda \cap S_0. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

O funcional objetivo contém o quadrado do fluxo ao longo da parte livre do lençol freático. A escolha da localização do lençol freático ótimo força a função objetivo ser zero e vice-versa. Assim, o problema  $(P_1)$  interpreta o lençol freático  $\Gamma_\lambda$  como um contorno ótimo. O conceito de contorno ótimo inclui somente valores no contorno do domínio e não há necessidade de resolver o problema em todo domínio  $\Omega$  para encontrar o contorno ótimo. Por outro lado, encontrando  $\Gamma_\lambda$  podemos obter  $u(x,y)$  em  $\Omega$  resolvendo o problema de valor de contorno (1). Por esta razão consideraremos, somente, a seguir, a localização do lençol freático.

No caso do problema bidimensional, descrito pela equação de Laplace, os valores de fluxo e de potencial satisfazem no contorno  $\Gamma \equiv \partial\Omega$ , a equação integral, [12]:

$$0.5u(\xi) + \int_{\Gamma} q^*(\xi, \chi)u(\chi)d\Gamma = \int_{\Gamma} u^*(\xi, \chi)q(\chi)d\Gamma, \quad (2)$$

onde  $\chi \equiv (x, y) \in \Gamma$ ,  $u^*(\xi, \chi)$  é a solução fundamental da equação de Laplace,  $q^*(\xi, \chi)$  sua derivada normal e  $\xi \in \Gamma$  é o ponto de colocação. Desta maneira, para definir a localização do lençol freático temos o problema:

$$(P_2) \begin{cases} \min_{u, q \in \Phi} F(u, q), \\ \text{onde } q \text{ e } u \text{ verificam em } \Gamma_\lambda \text{ a equação integral:} \\ 0.5u(\xi) + \int_{\Gamma} q^*(\xi, \chi)u(\chi)d\Gamma = \int_{\Gamma} u^*(\xi, \chi)q(\chi)d\Gamma, \end{cases}$$

onde  $F(u, q) \equiv (q)_{\Gamma_\lambda \setminus S_0}^2$  e os valores de contorno são definidos como o problema (1).

## DISCRETIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

A formulação  $(P_2)$  nos conduz ao uso do método dos elementos de contorno para a

discretização Colocamos  $E$  nós (geométricos) e dividimos  $\Gamma$  em  $E$  elementos  $\Gamma = \sum_{j=1}^E \Gamma_j$ . Considerando aproximações funcionais constantes para o fluxo e o potencial para cada  $\Gamma_j$ ,  $j=1, \dots, E$ , obtemos a seguinte discretização da equação integral (2):

$$0.5u_i + \sum_{j=1}^E \left( \int_{\Gamma_j} q_i^* d\Gamma_j \right) u_j = \sum_{j=1}^E \left( \int_{\Gamma_j} u_i^* d\Gamma_j \right) q_j, \quad i=1, \dots, E$$

onde  $u_i = u(\xi_i)$ ,  $u_i^* = u^*(\xi_i, \chi)$ ,  $q_i^* = q^*(\xi_i, \chi)$ ,  $\xi_i \in \Gamma_i$  e  $u(\chi) \equiv u_j$ ,  $q(\chi) \equiv q_j$ ,  $\chi \in \Gamma_j$ ,  $j=1, \dots, E$ .

Usando as notações  $H_{ij} = \int_{\Gamma_j} q_i^* d\Gamma_j$  para  $i \neq j$ ,  $G_{ij} = \int_{\Gamma_j} u_i^* d\Gamma_j$  podemos reescrever esta equação na forma matricial como:

$$[H]u = [G]q$$

Sejam  $(x_i, y_i)$  as coordenadas dos nós  $i=1, \dots, E$  e  $x_{E+1} = x_1$ ,  $y_{E+1} = y_1$ . Então podemos obter formulas explicitas para os coeficientes  $G$  e  $H$ :

$$\forall i, j = 1, \dots, E, \quad i \neq j:$$

$$G_{ij} = -\sum_{k=1}^4 0.5\omega_k (a_x^2 + a_y^2)^{1/2} \ln\left((x_c - a_x\gamma_k - b_x)^2 + (y_c - a_y\gamma_k - b_y)^2\right), \quad (3)$$

$$H_{ij} = -\sum \frac{\omega_k (a_y(a_x\gamma_k + b_x - x_c) - a_x(a_y\gamma_k + b_y - y_c))}{(x_c - a_x\gamma_k - b_x)^2 + (y_c - a_y\gamma_k - b_y)^2}, \quad (4)$$

$$\forall i, j = 1, \dots, E, \quad i = j:$$

$$G_{ii} = 2(a_x^2 + a_y^2) \left(1 - \ln(a_x^2 + a_y^2)^{1/2}\right), \quad (5)$$

$$H_{ii} = \pi, \quad (6)$$

onde  $a_x = 0.5(x_{j+1} - x_j)$ ,  $b_x = 0.5(x_{j+1} + x_j)$ ,  $a_y = 0.5(y_{j+1} - y_j)$ ,  $b_y = 0.5(y_{j+1} + y_j)$ ,

$x_c = 0.5(x_i + x_{i+1})$ ,  $y_c = 0.5(y_i + y_{i+1})$ , e  $\gamma_k, \omega_k$  são as abscissa e peso da quadratura de Gauss respectivamente.

Sejam  $n, m, l, r$  e  $k$  os números de elementos de contorno localizados nos segmentos  $\Gamma_\sigma, \Gamma_\lambda, \Gamma_1, \Gamma_0$  e  $\Gamma_2$ , respectivamente. Seja  $m_1$  elementos na parte  $\Gamma_\lambda \setminus S_0$  e  $m_2$  elementos na parte de contato  $\Gamma \cup S_0$  do lençol freático, então  $m_1 + m_2 = m$ . Também assumimos que as  $x$ -coordenadas dos nós  $\Gamma_\lambda \setminus S_0$  e as  $y$ -coordenadas dos nós em  $\Gamma \cup S_0$  são fixos. Assim só as  $y$ -coordenadas definem a localização dos nós pertencentes à percolação e parte livre do lençol freático e as  $x$ -coordenadas definem os nós da parte de contato do lençol freático. Também usamos as seguintes notações:  $L \equiv l$ ,  $R \equiv L + r$ ,  $K \equiv R + k$ ,  $N \equiv K + n$ , desde que  $N + m \equiv E$ .

Para o problema discreto análogo (P<sub>2</sub>) consideramos como variáveis independentes o fluxo nos elementos de contorno de  $\Gamma_1: X_1 \dots X_L$ , o potencial nos elementos de contorno de  $\Gamma_0: X_{L+1} \dots X_R$ , o fluxo nos elementos de contorno de  $\Gamma_2, \Gamma_\sigma$ , e  $\Gamma_\lambda \setminus S_0: X_{R+1} \dots X_K, X_{K+1} \dots X_N$  e  $X_{N+1} \dots X_{E-m_2}$  respectivamente, o potencial nos elementos

de contorno  $\Gamma_\lambda \cup S_0$ :  $X_{E-m_2+1} \dots X_E$ ,  $y$ -coordenadas dos nós da superfície de percolação ( se  $n \geq 2$ );  $X_{E+1} \dots X_{E+n-1}$ ,  $y$ - e  $x$ -coordenadas dos nós do lençol freático:  $X_{E+n} \dots X_{E+n+m_1-1}$  e  $X_{E+n+m_1} \dots X_{E+n+m-1}$  respectivamente.

Sejam

$$\begin{aligned} X &= (X_1 \dots X_{E+n+m-1}), \\ U &= (u_1 \dots u_L, X_{L+1} \dots X_R, u_{R+1} \dots u_K, U_{K+1} \dots U_N, U_{N+1} \dots U_{E-m_2}, X_{E-m_2+1} \dots X_E), \\ Q &= (X_1 \dots X_L, q_{L+1} \dots q_R, X_{R+1} \dots X_K, X_{K+1} \dots X_N, X_{N+1} \dots X_{E-m_2}, q_{E-m_2+1} \dots q_E), \end{aligned}$$

onde os valores do potencial nos segmentos  $\Gamma_\sigma$  e  $\Gamma_\lambda \setminus S_0$  são definidos correspondentemente as condições de contorno do problema (1):

$$\begin{aligned} U_{K+i} &= 0.5(X_{E+i} + X_{E+i-1}), \quad i = 2, \dots, n + m_1 - 2, \\ U_{K+1} &= 0.5(X_{E+1} + h_2), \quad U_{E-m_2} = 0.5(h_0 + X_{E+n+m_1-1}), \end{aligned}$$

assim como também como o resto de valores de  $u$  e  $q$ .

Se existem nós na superfície de percolação (colocando  $n \geq 2$ ), as restrições para as  $y$ -coordenadas para estes nós seria:  $X_i - X_{i+1} \leq 0$ ,  $i = E + 1, \dots, E + n - 1$ . Temos também as restrições do mesmo tipo para as  $x$ -coordenadas dos nós na parte de contato do lençol freático se  $m_2 \geq 2$ :  $X_i - X_{i-1} \leq 0$ ,  $i = E + n + m_1 + 1, \dots, E + n + m - 1$ .

A função objetivo é  $F(X) = \sum_{i=N+1}^{E-m_2} X_i^2$ . Seguindo as formulas (3)-(6), os coeficientes de  $H$  e  $G$  são funções de  $X$ . Mais precisamente, das  $y$ -coordenadas dos nós das partes livres de percolação e lençol freático e das  $x$ -coordenadas dos nós da parte de contato do lençol freático:

$$\begin{aligned} H(X) &\equiv H(X_{E+1} \dots X_{E+n+m-1}), \\ G(X) &\equiv G(X_{E+1} \dots X_{E+n+m-1}). \end{aligned}$$

fazendo este tipo de discretização para o problema (P<sub>2</sub>), obtemos um problema de programação matemática não linear:

$$(P_2) \left\{ \begin{array}{l} \min F(X) \\ X \\ H(X)U - G(X)Q = 0 \\ X_i - X_{i+1} \leq 0, \quad i = E+1 \dots E+n-1, \quad (se \quad n \geq 2), \\ X_i - X_{i-1} \leq 0, \quad i = E+n+m_1+1 \dots E+n+m-1, \quad (se \quad m_2 \geq 2), \\ LOW \leq X_i \leq UP, \quad i = E+1, E+n, \dots E+n+m_1-1, \\ LEFT \leq X_{E+n+m-1}, \quad X_{E+n+m_1} \leq RIGHT. \end{array} \right.$$

O problema tem  $E+n+m-1$  variáveis,  $E$  restrições não lineares de igualdade,  $n+m_2-2$  restrições lineares de igualdade e  $m_1+1$  restrições de tipo “box”.  $LOW$ ,  $UP$ ,  $LEFT$ ,  $RIGHT$  definem os limites para as  $y$ -coordenadas e  $x$ -coordenadas não conhecidas dos nós do lençol freático respectivamente. Observemos que o fluxo e o potencial  $X_1 \dots X_E$  nos elementos de contorno e variáveis de forma  $X_{E+1} \dots X_{E+n+m+1}$  são variáveis independentes do problema de programação matemática ( $P_3$ ). Assim a função objetivo  $F(X)$  é quadrática com relação as variáveis do problema.

Para resolver o problema de programação matemática não linear ( $P_3$ ) usamos o algoritmo do ponto interior de Herkovits, [11]. Encontramos as  $y$ -coordenadas dos nós da parte livre do lençol freático e superfície de percolação como também as  $x$ -coordenadas da parte de contato do lençol freático e também, valores de potencial e fluxo nos correspondentes segmentos de contorno.

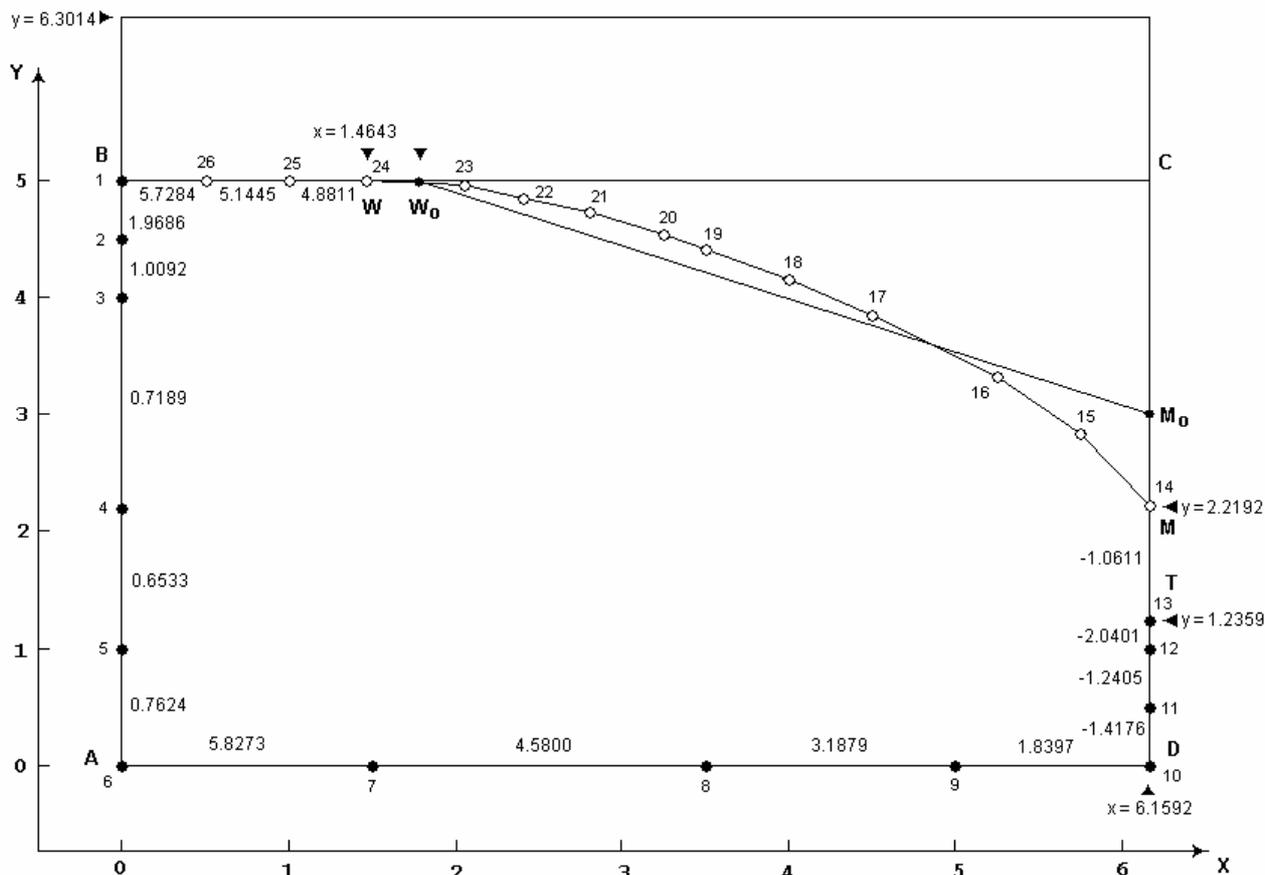
## TESTES NUMERICOS

Para o problema teste, sejam:  $h_1 = 6.3014$ ,  $h_2 = 1.2359$ ,  $l = 6.1592$  e  $d = 1.3014$  ( $h_0 = 0.5$ ). Estes dados são tomados para comparar a solução do problema de impacto florestal com o problema de percolação, considerado em [13]. O fluxo por sucção é considerado como  $\varepsilon = 1$ .

A discretização tem 26 elementos de contorno ( $l = 5$ ,  $r = 4$ ,  $k = 3$ ,  $n = 1$ ,  $m_1 = 10$ ,  $m_2 = 3$ ), ver Fig.2. Encontraremos as  $y$ -coordenadas de dez nós na parte livre do lençol freático  $W - M$  e as  $x$ -coordenadas dos três nós da parte de contato do lençol freático  $B - W$ . A posição do nó 24 define a localização do ponto de contato do lençol freático (ponto  $W$ ). As coordenadas dos nós restantes são fixos. A posição do lençol freático inicial, usado na primeira iteração do algoritmo, é definido pelo segmento de reta  $B - W_0 - M_0$ . Para as restrições de tipo “box” tomamos:  $UP = h_0$ ,  $LOW = h_2$ ,  $LEFT = 0.0$ ,  $RIGHT = 2.0$ .

O programa matemático tem 39 variáveis, 26 restrições não lineares de igualdade, 12 restrições de tipo “box” e 2 restrições lineares de desigualdade. No algoritmo usamos o critério de

parada com precisão  $10E-6$ . Com dados iniciais diferentes, a convergência do algoritmo foi obtida em não mais que 20 iterações.



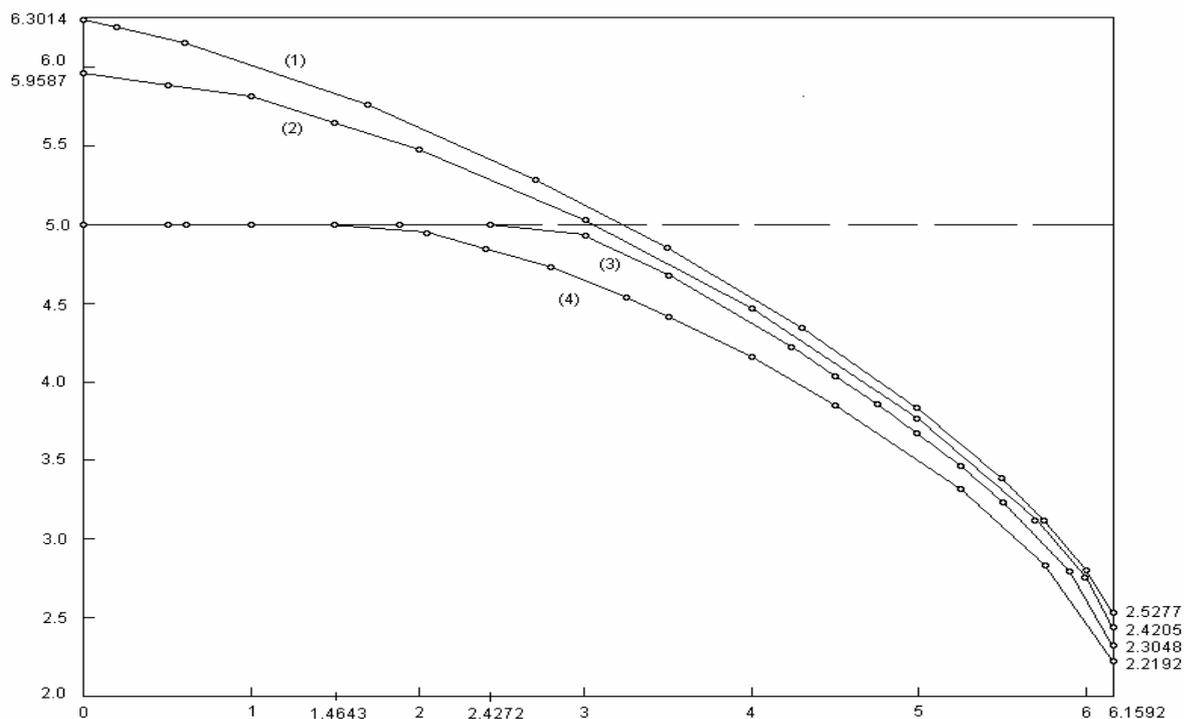
**Figura 2** - Lençol Freático junto a região de contato obtidos numericamente

As coordenadas obtidas dos nós do lençol freático e valores calculados do fluxo e potencial nos correspondentes elementos de contorno do lençol freático são dadas na Tabela 1. Nesta tabela a primeira coluna indica o número do nó, a segunda e terceira correspondem as  $x$  e  $y$  coordenadas dos nós do lençol freático obtidos numericamente. A quarta coluna mostra o valor do fluxo (potencial) calculado nos correspondentes elementos de contorno. A Fig. 2 mostra a localização do lençol freático (linha contínua  $B - W - M$ ) e posições dos nós correspondentes (14 - 26) calculados numericamente. Também são representados os dados do contorno na Fig. 2, i.e. o fluxo nos segmentos  $A - B$ ,  $D - T$  e  $T - M$  e o potencial para os segmentos  $A - D$  e  $B - W$ .

**Tabela 1** - Coordenadas do lençol freático e valores no contorno obtidos

no	x *valor fixo	y *valor fixo	q *valor de $u$
14	6.1592*	2.2192	-1.17240E-07
15	5.7500*	2.8368	-2.82183E-08
16	5.2500*	3.3175	2.23091E-07
17	4.5000*	3.8532	5.45910E-07
18	4.0000*	4.1583	-1.23321E-07
19	3.5000*	4.4158	-2.90582E-07
20	3.2500*	4.5345	2.36618E-07
21	2.8000*	4.7249	-2.24024E-07
22	2.4000*	4.8467	-2.45834E-07
23	2.0500*	4.9553	3.35504E-07
24	1.4643	5.0000*	4.88110*
25	0.9270	5.0000*	5.14453*
26	0.4977	5.0000*	5.72835*

Comparamos a localização do lençol freático do problema de impacto florestal com a solução de outros problemas não confinados, tendo os mesmos parâmetros geométricos e piezométricos. Os resultados são apresentados na Fig. 3. Aqui a curva (1) define a localização do lençol freático para o problema de percolação clássica, a curva (2) define a localização do lençol freático para o problema não confinado com parede impermeável. A curva (3) representa o lençol freático para o caso de um objeto impermeável fixo  $S_0$ ; a curva (4) é a solução do problema de impacto florestal com taxa de sucção constante  $\varepsilon=1$ .



**Figura 3 - Localização do Lençol Freático de Outros Problemas não Confinados**

## CONCLUSÃO

Este trabalho propõe uma aproximação para a simulação numérica para escoamento permanente num meio poroso não confinado com possível descarga através do lençol freático. Nosso método combina três aspectos principais: transformação do problema original para um problema de otimização de forma, técnica de programação matemática junto a discretização por elementos de contorno. Assim, não há a necessidade de fazer qualquer análise de sensibilidade. A função objetivo é quadrática com relação as variáveis do problema. O método é simples de ser aplicado e pode ser usado para problemas 3D. A simulação numérica mostra que em nosso modelo simples o rebaixamento do lençol freático devido à sucção do sistema radicular de florestas é de significado relevante. Este resultado sugere que a simulação da sucção de florestas pode ser considerado como um meio efetivo para o controle de águas subterrâneas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores estão plenamente agradecidos ao CNPq (Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bari MA, Schofield NJ. Lowering of a shallow saline water table by extensive eucalypt reforestation. *Journal of Hydrology*. 1992; 133: 273-291.
- [2] Bell RW, Schofield NJ, Loh IC, Bari MA. Groundwater response to reforestation in the Darling Range of Western Australia. *Journal of Hydrology*. 1991; 119: 179-200.
- [3] Blight GE. Lowering of the groundwater table by deep-rooted vegetation - The geotechnical effects of water table recovery. In: E.T.Hanrahan, T.L.L.Orr and T.F.Widdi (Editors), *Groundwater Effects in Geotechnical Engineering*, Proceedings of the Ninth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 31 August - 3 September 1987. Dublin. 1987; 1:285-288.
- [4] Leontiev A, Busse RS, Huacasi W, Herskovits J, Mota Soares CM. Identification of the groundwater table location in the forest impact problem. *4<sup>th</sup> International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice (ICIPE-2002)*, Angra dos Reis-RJ, Brazil, May 26-31, 2002.
- [5] Lewis RW, Schrefler BA. *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*. Wiley: New York, 1998.
- [6] Polubarinova-Kochina PYa. *Theory of Ground Water Movement*. Princeton University Press: Princeton, 1962.
- [7] Liggett JA. Location of the free surface in porous media. *J. Hyd. Div., ASCE* 1997; 103: 353-365.
- [8] Baiocchi C, Capelo A. *Variational and Quasivariational Inequalities. Applications to Free Boundary Problems*. Wiley: New York, 1984.
- [9] Pozzi G. On a free-boundary problem arising from fluid flow through a porous medium in the presence of evaporation. *Bollettino U. M. I.* 1974; 9(4): 416-440.
- [10] Haslinger J, Neittaanmäki P. *Finite Element Approximation for Optimal Shape Design: Theory and Applications*. Wiley: New York, 1992.
- [11] Herskovits J. Feasible direction interior-point technique for nonlinear optimization. *Journal of Optimization Theory and Applications* 1998; 99: 121-146.
- [12] Brebbia CA, Telles JCF, Wrobel LC. *Boundary Elements Techniques - Theory and Applications in Engineering*. Springer: Berlin, 1984.
- [13] Leontiev A, Huacasi W. Mathematical programming approach for unconfined seepage problem. *International Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2001; 25(1): 49-56.