

# **AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA CALIBRAÇÃO DE MODELO DE FLUXO DA ÁGUA EM SOLO NÃO SATURADO UTILIZANDO UM ESTUDO EXPERIMENTAL**

*AGUERO-MARTINEZ, D. S.<sup>1</sup>*

## **RESUMO**

Este trabalho visa avaliar a técnica dos Algoritmos Genéticos (AG) na calibração de um modelo que simula um estudo experimental sobre infiltração. Foi utilizado o modelo numérico de Koide (1990). Atualmente, devido à ajuda da computação, a utilização do modelo inverso resulta atraente aos cientistas para calibragem de modelos. Os AG é uma técnica matemática que otimiza uma Função Objetivo (FO) resolvendo o modelo inverso. A utilização de uma só FO resulta em problemas de unicidade de resposta (Beven, 2005). Este artigo utiliza os dados observados do fenômeno de infiltração simulado em laboratório por Vauclin *et al.* (1979). Conclui-se que existem vários conjuntos de parâmetros que ajustam os dados observados.

Palavras-Chave: Solos não saturados, parâmetros de Van Genuchten, Algoritmos Genéticos.

## **EVALUATION OF GENETIC ALGORITHMS IN CALIBRATION MODEL OF WATER FLOW IN UNSATURATED USING AN EXPERIMENTAL STUDY**

### **ABSTRACT**

This study aims to evaluate the technique of Genetic Algorithms (AG) to calibrate a model that simulates an experimental study on infiltration. We used the numerical model Koide (1990). Currently, due to the help of the computer, using the inverse model results compelling scientists to calibrate the models. GA is a mathematical technique that optimize an objective function (FO) solving the inverse problem. The use of a single FO results in problems of uniqueness response (Beven, 2005). This article uses observed data from the phenomenon of infiltration simulated in laboratory by Vauclin *et al.* (1979). It is concluded that there are several sets of parameters which adjust the observed data.

Keywords: Unsaturated soils, van Genuchten parameters, Genetic Algorithms (AG).

## **INTRODUÇÃO**

O uso de modelo hidrológico de fluxo de água na zona não saturada constitui ser uma ferramenta importante para o gerenciamento e otimização dos recursos hídricos (Singh *et al.*, 2010). No entanto, um obstáculo importante na aplicação desse modelo encontra-se na dificuldade de determinar suas propriedades hidráulicas (Ines e Droogers, 2002). Atualmente, os modelos matemáticos hidrológicos utilizam as equações de Richards (1931) sujeitos às equações de retenção de água no solo. A equação de retenção muito reconhecido na literatura resulta ser a desenvolvida por van Genuchten (1980). Ines e Droogers (2002) calibraram esse tipo de modelo hidrológico valendo-se de dados de evapotranspiração e um modelo matemático (SWAP) otimizando uma Função Objetivo (FO). Para isso, apelaram à fonte computacional para iteração contínua das equações do modelo hidrológico utilizando a técnica dos AG. Seguindo essa linha de pesquisa, este trabalho utilizou o modelo de Koide (1990) que também resolve a equação de Richards utilizando o

---

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Mestre em Geotecnia – Dep. de Geotecnia da UnB, Doutorando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – PTARH – UNB e Professor concursado do Instituto Federal de Goiás – IFG – Lotação Formosa.

modelo de van Genuchten (1980) (MVG). Para o teste de modelo inverso propõe-se utilizar a base de dados do experimento de infiltração que se descreve na sequência.

## INSTRUMENTOS E MÉTODOS

A simulação de recarga de aquíferos de Vauclin *et al.* (1979) resulta de interesse, pois o autor apresenta dados observados na zona não saturada. Esse autor efetuou um experimento que simula uma recarga de aquífero em duas dimensões, apresentado esquematicamente na Figura 1.

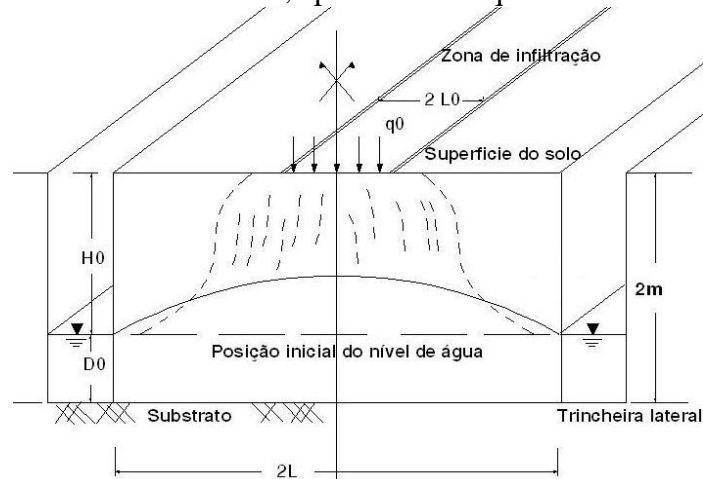


Figura 1 – Diagrama esquemático do experimento de infiltração (modificado – Vauclin *et al.*, 1979)

A Figura 2 apresenta os dados observados, representados em pares ordenados de umidade volumétrica e potencial matricial, obtidos em laboratório por Vauclin *et al.* (1979). Essa figura apresenta também duas curvas de retenção da água no solo, chamados de limiar superior e limiar inferior, respectivamente. Essas curvas definem um campo de busca dos AG. Dessa forma a curva de retenção de calibragem deve representar esses pares ordenados de dados observados já mencionados.

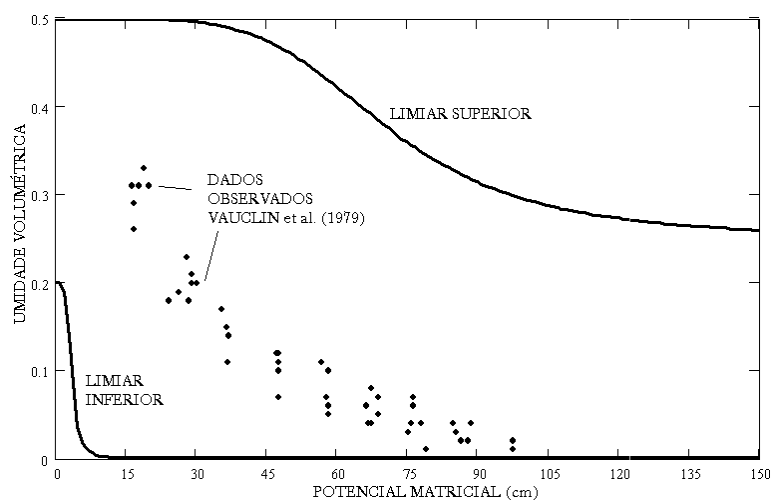


Figura 2 – Limiares superior e inferior de busca AG. Apresenta-se também os dados observados do solo determinados em laboratório por Vauclin *et al.* (1979)

Os parâmetros do modelo a serem calibrados encontram-se nas equações de retenção da água no solo do modelo de van Genuchten (1980) (MVG) como mostrado nas Equações 1, 2a e 2b:

$$\frac{\theta_i^j - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha |\psi_i^j|)^n} \right]^m \quad (1)$$

sendo:  $i$  o ponto de controle no espaço;  $j$  o índice de tempo;  $\theta_i^j$  a umidade volumétrica, no tempo  $j$  e no espaço  $i$ ;  $\theta_{sat}$  a umidade do solo saturado;  $\theta_{res}$  a umidade residual;  $\psi_i^j$  o potencial matricial no tempo  $j$  e no espaço  $i$  (L);  $\alpha$  o coeficiente adimensional;  $n$  o coeficiente adimensional;  $m = (n-1)/(n)$ .

As condutividades hidráulicas, para as direções  $z$  e  $x$ , respectivamente, são:

$$Kz_i^j = Kz_{sat} \left( \frac{\theta_i^j - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta_i^j - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (2a)$$

$$Kx_i^j = Kx_{sat} \left( \frac{\theta_i^j - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta_i^j - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (2b)$$

sendo:  $Kz_i^j$  = condutividade hidráulica na direção  $z$ , no tempo  $j$ , no espaço  $i$  (L/T);  $Kx_i^j$  = condutividade hidráulica na direção  $x$ , no tempo  $j$ , no espaço  $i$  (L/T);  $Kz_{sat}$  = condutividade hidráulica do solo saturado na direção  $z$  (L/T);  $Kx_{sat}$  = condutividade hidráulica do solo saturado na direção  $x$  (L/T); os demais parâmetros já foram definidos.

A Tabela 1 estabelece a faixa de valores, maior e menor, utilizados para o processo de busca dos valores simulados dos seis parâmetros do MVG.

Tabela 1 – Faixa de valores utilizados para o processo de busca

Parâmetros	n	$\alpha$	$Kx_{sat}$ (cm/h)	$Kz_{sat}$ (cm/h)	$\theta_{sat}$	$\theta_{res}$
Valor maior	15,00	0,5000	350,00	350,00	0,50	0,50
Valor menor	1,01	0,0001	0,00	0,00	0,00	0,00

Õ domínio do experimento de infiltração foi discretizado em elementos finitos triangulares como exibido na Figura 3. Essa figura apresenta também os quinze pontos de controle que foram monitorados durante o experimento indicando a mudança de posição do nível freático em diferentes períodos de tempo de duas, três, quatro e oito horas, respectivamente. Sobre as condições de contorno do modelo, essas se encontram bem definidos no experimento: condiciones iniciais de fluxo constante de água, na parte superior do domínio, e de potencial conhecido quando a água infiltrada atinge o aquífero do experimento.

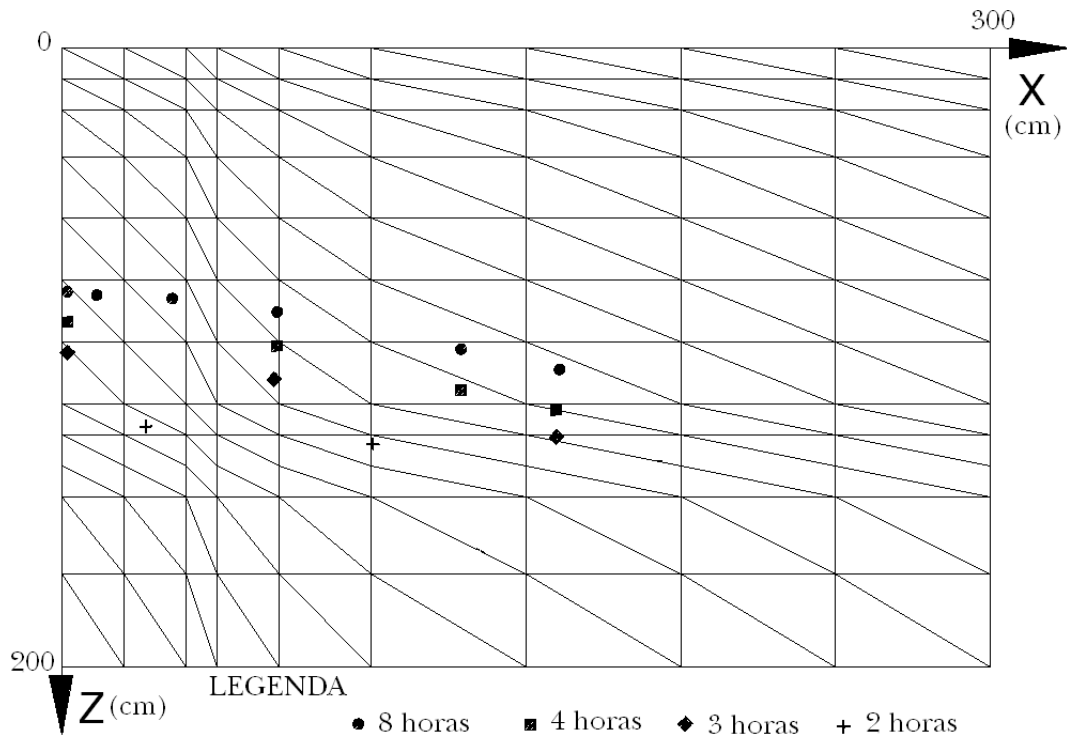


Figura 3 – Malha adotada no domínio do experimento de Vauclin *et al.* (1979). Apresentam-se também os quinze pontos de controle

Na FO estabelecida devem ser ajustados, nos pontos de controle, os valores de dados simulados e os valores de dados observados. Tucci (1985) discutiu umas formulações de FO, porém o uso dessas pode resultar em valores elevados da FO, incluindo aquela formulação com a inversa das variáveis, sendo que podem existir valores de dados simulados muito pequenos. A formulação de FO de Ines e Droogers (2002) não mostra o que acontece quando os valores dos dados simulados e observados foram iguais. Intuitivamente em programação sempre é desejável uma formulação que não leve a resultados elevados que poderiam ser uma causa de instabilidade do programa. Optou-se, assim, por uma FO mostrado na Equação 3:

$$FO = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n |P_{i_{Observado}} - P_{i_{Simulado}}|} \quad (3)$$

sendo:  $P_{i_{Observado}}$  o valor de potencial matricial medido experimentalmente no ponto de controle  $i$  em relação ao tempo e ao espaço;  $P_{i_{Simulado}}$  o valor de potencial matricial simulado no ponto de controle  $i$  em relação ao tempo e ao espaço;  $n$  o número total de pontos de controle, quinze para o experimento de Vauclin *et al.* (1979);  $\sum_{i=1}^n |P_{i_{Observado}} - P_{i_{Simulado}}|$  o resultante do somatório dos valores absolutos das diferenças entre o  $P_{i_{Observado}}$  e o  $P_{i_{Simulado}}$  em todos os pontos de controle do experimento.

A ideia de computação evolucionária apareceu na década dos 60, mas foi com o livro de Holland (1975) que nasceram os AG. Esses algoritmos usam como modelo a teoria da evolução de Charles Darwin: elementos computacionais gerando descendentes para no final sobreviverem os mais aptos. Desse modo, os AG são algoritmos de busca estocástica de uma solução ótima para uma função custo. Os elementos computacionais chamados de “população” serão avaliados e combinados, de tal forma, que o processo de busca deverá tender ao ótimo da função custo achando o descendente de “maior aptidão” ou “de melhor índice de desempenho” (*best fitness*). O primeiro passo de um AG típico é a geração de uma “população inicial de cromossomos”, que é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam possíveis soluções do problema a ser resolvido. Durante o “processo evolutivo”, essa população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota, denominada de “aptidão” ou “índice de desempenho” (*fitness*), refletindo a qualidade da solução que esse representa. Em geral, os cromossomos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados. Há três operações básicas que acontecem nos AG tradicionais para criar uma próxima geração: (1) seleção; (2) cruzamento (*crossover*); e (3) mutação. Cada par de pais criam um filho (composto de um conjunto de cromossomos) que resulta ser uma mistura dos cromossomos pais. O processo de misturar os pais para a criação dos filhos continua até gerar uma população completamente nova de tamanho de população  $N$ . Assim os pais mais fortes criarão uma geração de filhos mais aptos; na prática, a aptidão comum da população tende a aumentar com cada nova geração. A aptidão de cada um dos filhos é determinada e o processo de Seleção - Crossover - Mutação (SCM) é repetido. Gerações sucessivas são criadas até que os filhos mais aptos sejam obtidos. Para Sá (2003) os AG são métodos com preceitos diferentes tanto do ponto de vista conceitual quanto prático, os AG não possuem as mesmas limitações que os métodos de otimização tradicionais. Segundo esse autor, espaços não-convexos e variáveis discretas, por exemplo, não acarretam grandes problemas para os AG e seu desempenho para funções objetivo multimodais também tende a ser melhor porque, os AG varrem o espaço de busca de uma forma mais global do que os métodos tradicionais. Mas nesses últimos anos os AG mostraram dificuldades em representar um conjunto único de respostas, como será demonstrado neste trabalho.

## **RESULTADOS E CONCLUSÕES.**

Como fonte computacional foi utilizado um Cluster. No emprego dos AG, foi utilizada uma população inicial de cinco indivíduos, isto é, cinco conjuntos de entrada de valores iniciais de parâmetros. A Tabela 2 compara os resultados simulados dos valores dos parâmetros das equações de van Genuchten (1980) com os valores dos dados experimentais de solo obtidos por Vauclin *et al.* (1979).

Tabela 2 – Comparação dos valores simulados contra os valores obtidos experimentalmente por Vauclin *et al.* (1979)

	n	$\alpha$	$Kx_{sat}$ (cm/h)	$Kz_{sat}$ (cm/h)	$\theta_{sat}$	$\theta_{res}$
Simulação numérica	3,57	0,03	32,22	32,84	0,31	0,02
Valores do experimento de Vauclin <i>et al.</i> (1979)	----	----	35,00	35,00	0,30	0,00

A Figura 4 compara a curva de retenção que utiliza os valores dos parâmetros obtidos pela simulação numérica da Tabela 2, chamada “curva AG”, contra a curva do modelo aplicado por Vauclin *et al.* (1979), denominada de “curva Vauclin”. A Figura 5 indica a localização dos pontos de controle e em linha tracejada a mudança de posição do nível freático em função do tempo segundo a simulação realizada por Vauclin *et al.* (1979). Essa figura também apresenta as curvas da mudança de lençol freático tanto temporalmente e espacialmente, em linhas sólidas e chamada de “modelo AG”, segundo a simulação proposta neste trabalho.

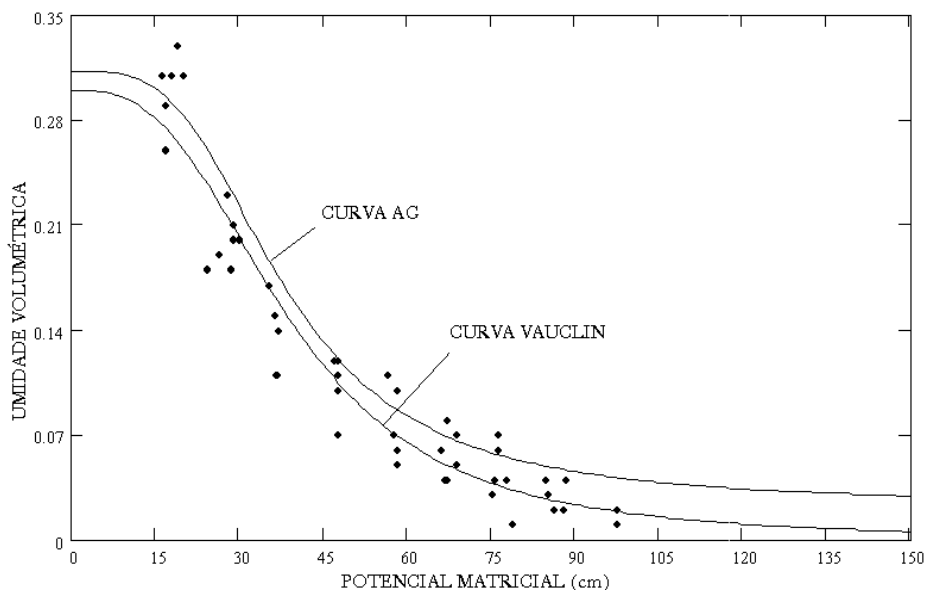


Figura 4 – Comparação da curva de retenção da equação de van Genuchten (1980), denominada “curva AG” contra a curva de retenção obtida por Vauclin *et al.* (1979), denominada de “curva Vauclin”

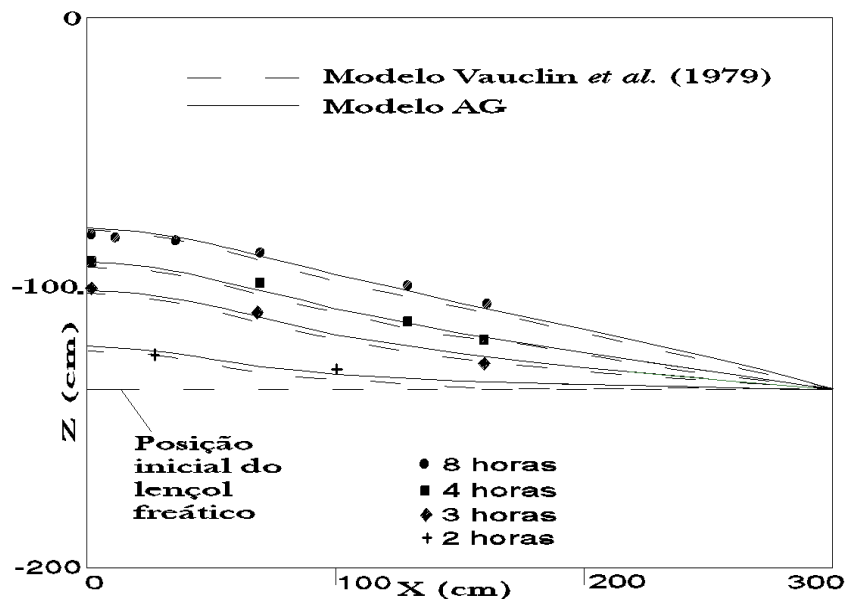


Figura 5 – Localização dos pontos de controle e o traçado das linhas resultantes da aplicação dos modelos: tracejada, modelo de Vauclin *et al.* (1979), e; a linha sólida, curvas obtidas com a simulação proposta. Escala em cm

Como foi mencionado, segundo Beven (2005), entre outros autores, fundamentou que existe o problema de não unicidade de resposta na calibração de modelo. Conforme com isso, neste trabalho foram encontradas vários conjuntos de parâmetros que otimizaram a FO estabelecida. A modo de exemplo, na Figura 6 apresentam-se três curvas resposta cujos parâmetros otimizaram a FO. Essas curvas foram denominadas “CURVAS AG”.

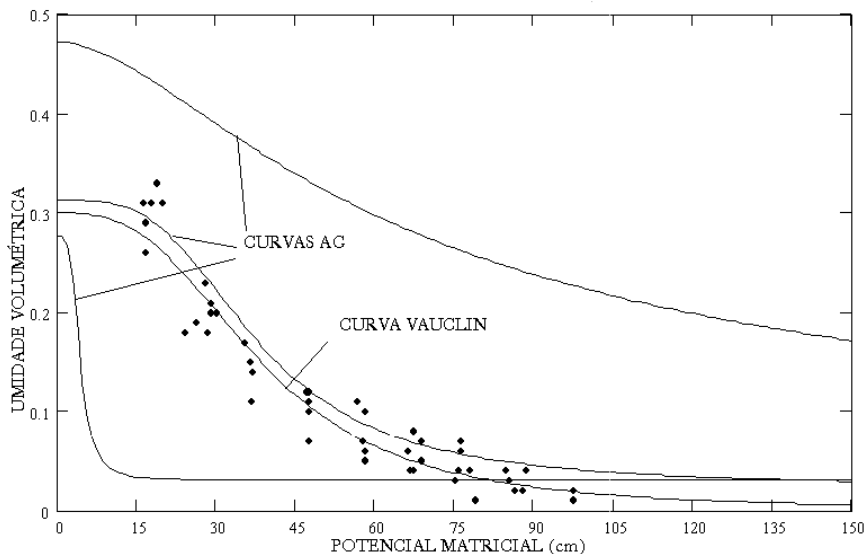


Figura 6 – Curvas de retenção obtidas com a simulação proposta denominadas de “curvas AG”

A Figura 7 apresenta os três lençóis freáticos nos diferentes tempos simulados dos conjuntos de parâmetros correspondentes às três curvas de retenção simuladas da Figura 6.

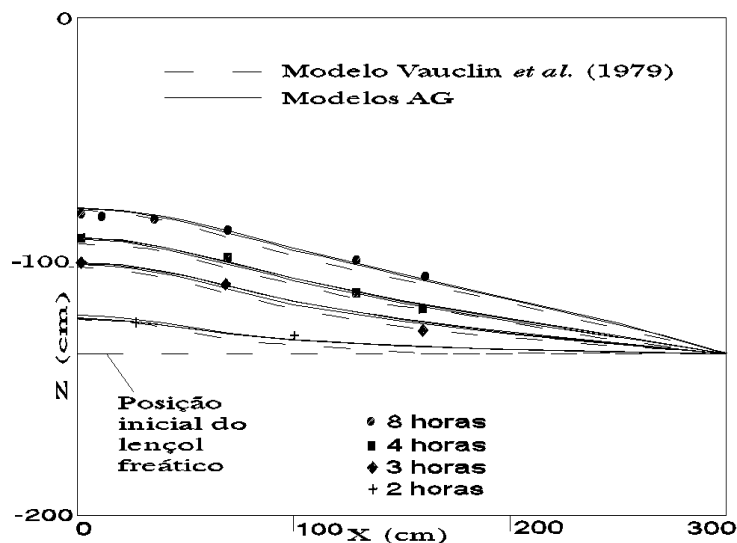


Figura 7 – Três curvas de lençol freático simuladas, correspondentes aos três diferentes conjuntos de parâmetros calibrados do MVG. Escala em cm

Conclui-se que as curvas simuladas se ajustam aos pontos de controle razoavelmente comprovando a veracidade do conceito de equifinalidade proposta por Beven (2005).

## REFERÊNCIAS

- BEVEN, K. J. (2005). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology* XX, 1-19.
- CARROLL, D. L. (2001). D.L. Carroll's Fortran Genetic Algorithm Driver. Readme txt. Publicação Accesível ao Público.
- GOLDBERG, D. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley.
- INES, A.V.M. e DROOGERS, P. (2002). Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. *Hydrology Earth System Sciences*, 6, 49-66.
- KOIDE, S. (1990). *Hillslope Subsurface Flow Study by Finite Element Method*. Tese de Doutorado, University of London, London, Inglaterra, 306p.
- RICHARDS, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1, 318,333.
- SÁ, C.B.P. (2003). *Calibração Automática de Modelos Ecológicos Baseados em Equações Diferenciais Ordinárias utilizando Algoritmos Genéticos*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. XI, 268 p.
- SINGH, U. K.; REN, L; KANG, S. (2010). Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques. *Agricultural Water Managment*, Vol. 97 Issue 8, p 1210-1220.
- TUCCI, C.E.M. (1985). *Modelos Matemáticos em Hidrologia e Hidráulica*. Editora da RBE, (Rio de Janeiro), 3 volumes, 600 p.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am.,J.* 44:892-898.
- VAUCLIN, M.; HAVERKAMP, R.; et VACHAUD, G. (1979). *Résolution numérique d'une équation de diffusion non Einéaire. Application à l'infiltration dans les sols non saturés*. Presses Universitaires de Grenoble.