

CALIBRAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Danilo Bossarino^{1} & José Anderson do Nascimento Batista²*

Resumo - Um dos mais importantes atributos físicos do solo é a curva de retenção. Diante das dificuldades de determinar este atributo em laboratório, devido ao comportamento histerético da curva em relação aos diferentes efeitos gerados pelo umedecimento e pelo secamento, recorre-se a modelos matemáticos. Assim, este trabalho estudou o comportamento do modelo de van Genuchten diante de diferentes métodos de calibração. Foram utilizados seis métodos de otimização de funções não lineares, empregando os dados experimentais de curvas de retenção em dois tipos de solos com perfis profundos. Os resultados mostraram que o método de Nelder-Mead obteve menores resíduos de ajuste do modelo nos dois tipos de solos estudados. Todos os métodos automáticos que convergiram a uma solução atingiram qualidade de ajuste superior aos de calibração manual. Em alguns casos, os melhores resultados entre menor erro, menor tempo computacional e menor número de chamadas foram obtidos pelo método de Levenberg-Marquardt. A análise de sensibilidade mostrou que os parâmetros de umidade de saturação e o expoente da carga mátrica são os decisivos para o sucesso da calibração.

Palavras-Chave – curva de retenção de água no solo; métodos de calibração; infiltração de água no solo.

CALIBRATION OF MATHEMATICAL MODELS OF SOIL WATER RETENTION CURVES

Abstract – One of the most important soil physical attributes is the retention curve. Due to the difficulties of determining this attribute in laboratories because of hysteretic behavior of the curve, one may recur to mathematical models. This paper studied the behavior of van Genuchten model due of different calibration methods. It was used six methods of optimization of nonlinear functions, using the experimental data retention curves in two types of soils with deep profiles. The results showed that the method of Nelder-Mead found lower residues of model fit in both types of soils. All automatic methods that converged to a solution reached higher quality setting to manual calibration. In some cases, best results in terms of smallest error, smallest computational time and a smaller number of calls have been obtained using the method of Levenberg-Marquardt algorithm. The sensitivity analysis showed that the parameters of saturation moisture and the numerical exponent in the matric potential variable are decisive for the success of the calibration.

Keywords – soil water retention curve; calibration methods; soil water infiltration.

^{1,2} Departamento de Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) – Universidade Estadual de Campinas

¹ Mestre em Engenharia Civil; danielobossarino@yahoo.com.br

² Prof. Adjunto da FEC / Unicamp; nbatista@fec.unicamp.br

INTRODUÇÃO

Um importante atributo físico do solo é a curva de retenção de água no solo. Segundo Libardi (2005) a curva de retenção da água no solo, também conhecida como curva característica de água no solo é a curva que relaciona o teor ou o conteúdo de água no solo com a tensão com que ela se encontra retida. A determinação da curva de retenção de água do solo é essencial no estudo das relações solo-água (Tormena e Silva, 2002; Queiroz *et al.*, 1995).

Segundo Libardi (2005), em laboratório, há duas maneiras diretas para a obtenção da curva de retenção de água no solo. A primeira maneira utiliza uma câmara submetida a pressões controladas de ar (câmara de pressão de Richards). Esta consiste, basicamente, de uma câmara construída para suportar alta pressão, com uma placa de cerâmica porosa para drenar a amostra no seu interior. Já o método do funil de placa porosa (também conhecido como funil de Haines) utiliza piezômetros e, por isso, é um método de mais baixo custo que o da câmara de Richards. Nele, coloca-se uma amostra de solo na superfície da placa porosa do funil, procede-se a sua saturação com água, mantendo-se o nível do piezômetro no topo da amostra por um período de 24 horas, para sua completa saturação e, em seguida, abaixa-se este nível a uma determinada altura (Libardi, 2005).

Há também modelos teóricos para se determinar a curva de retenção, baseados na distribuição granulométrica do solo. Segundo Swanson *et al.* (1999), os trabalhos publicados na literatura indicam que os métodos teóricos para a previsão da curva de retenção utilizando a distribuição granulométrica são mais acurados para solos que apresentam uma distribuição uniforme do que para os solos que apresentam uma distribuição bem graduada (várias frações de diâmetro diferentes misturadas).

Limites de tensão mátrica para solos argilosos ultrapassam o limite frequente de 1.500 kPa (Vanapalli *et al.*, 1998) pois muitas espécies utilizadas na agricultura têm esse ponto como ponto de murcha permanente. Para solos de granulometria fina tem sido demonstrado o limite teórico de tensão mátrica no solo em 1.000.000 kPa, para umidade nula, segundo resultados de Fredlund e Xing (1994). A percolação de água para o subsolo abaixo da zona de raízes possui os valores da curva de retenção que não estão sujeitos ao valor do ponto de murcha permanente. Estudos hidrológicos baseados em modelos numéricos / determinísticos utilizam curvas de retenção teóricas para representar extensas faixas de valores possíveis de umidade no solo.

Bravo *et al.* (2007) definem calibração como uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico são modificados pelo usuário manualmente, ou por meio de uma técnica numérica automaticamente, com o objetivo de encontrar uma boa concordância entre os valores calculados (simulados) e os valores observados das variáveis de saída. A aplicação de técnicas de calibração é realizada por intermédio de uma quantidade de valores observados igual ou superior à quantidade de parâmetros a serem calibrados no modelo.

Graciosa *et al.* (2008) realizaram um estudo de simulação hidráulica de trincheiras de infiltração com o objetivo de calibrar um modelo empírico de infiltração bidimensional a partir de experimentos de campo em dois solos, sendo o primeiro com maior teor de argila e o segundo com maior teor de areia. Os autores utilizaram o modelo de van Genuchten para condutividade hidráulica não saturada, em lugar de uma equação polinomial proposta originalmente no trabalho, o que proporcionou um melhor ajuste da calibração, uma vez que é utilizado um único conjunto de parâmetros para todas as equações do modelo. Os resultados das simulações revelaram que, partindo da pior hipótese, que é a condição de saturação do solo, as trincheiras são capazes de infiltrar 40% da chuva de projeto.

Na Holanda, Scorza Júnior e Boesten (2005) testaram o modelo SWAP (*Soil, Water, Atmosphere and Plant*) para simular os perfis de umidade do solo em um solo argiloso rachado e obtiveram boas simulações após a calibração de curvas de retenção de água. O SWAP simula o transporte de água, solutos e calor na zona não saturada, em interação com vegetação de desenvolvimento. Scorza Júnior *et al.* (2010) testaram e calibraram o simulador SWAP, pela modelagem inversa, para descrever os perfis de umidade em um Latossolo bastante argiloso, na cidade de Dourados, Mato Grosso do Sul. Os dados de entrada para o simulador SWAP (curvas de retenção de água no solo e dados meteorológicos) foram baseados em medições na área experimental. Simulações baseadas nas curvas de retenção não calibradas resultaram em perfis de umidade com níveis superiores às observadas em quase todas as datas de amostragem, especialmente para a profundidade de 0-10 cm. Após a calibração das curvas de retenção, obteve-se boa melhora nas simulações dos perfis de umidade, que ficaram dentro dos valores medidos para quase todas as profundidades e datas de amostragem.

Deste modo, a proposta deste trabalho foi buscar métodos de calibração automática para ajustar curvas de retenção com dados experimentais utilizados por Nichol *et al.* (2008). A finalidade do estudo foi a avaliação de seis métodos de calibração, mostrando sua aplicabilidade neste tipo de problema.

METODOLOGIA

Nichol *et al.* (2008) realizaram um experimento em laboratório, no qual um protótipo de lisímetro (grande coluna de solo em laboratório) foi instalado em uma coluna de aço, com 0,55 m de diâmetro e 3,60 m de altura.

Os dados de potencial mátrico, em função do conteúdo de água volumétrico do solo, utilizados no trabalho de Nichol *et al.* (2008) constam em nosso trabalho, devido à altura da coluna de solo, utilizada pelos autores, representar um perfil de solo profundo. A finalidade do uso destes dados neste trabalho foi ajustar os parâmetros de um modelo de curva de retenção, o de van Genuchten, utilizado por Nichol *et al.* (2008).

A curva de retenção de água do solo, proposta por van Genuchten (1980) é baseada empiricamente em uma função tipicamente conhecida por sua forma de “S”:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \cdot |\phi_m|)^n\right]^m} \quad (1)$$

com $m = 1 - 1/n$ e no qual ϕ_m (L) é a carga de pressão de água nos poros do solo e θ é o conteúdo de água volumétrico ($L^3 L^{-3}$). É um modelo classificado como empírico, não linear, determinístico, contínuo, pontual e estático.

A expressão (1) utiliza quatro parâmetros, gerados pelo modelo, para o ajuste da curva de retenção: θ_s , conteúdo de água na saturação ($L^3 L^{-3}$), θ_r , conteúdo de água residual ($L^3 L^{-3}$), α , que representa o inverso do potencial de entrada de ar (L^{-1}), e n , que é um índice da distribuição dos tamanhos de poros. Os parâmetros α e n definem o formato da curva.

Neste modelo, o valor de θ tende para θ_s , quando ϕ_m tende para zero; e para θ_r , quando ϕ_m tende para um valor de tensão muito elevado.

O estudo de Nichol *et al.* (2008) utilizou dois tipos de solos: farinha de sílica (*silica flour*), contendo 11 pontos da função potencial mátrico em função do conteúdo de água e solo repositório (*waste rock*), contendo 18 pontos da mesma função. Este solo é formado por resíduos de uma mina de urânio (20 a 30 m de profundidade), na região do norte de Saskatchewan, Canadá.

Neste trabalho, a cada um dos quatro parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten foram atribuídos valores iniciais, valores mínimo e máximo, para a implementação dos métodos de calibração.

Tabela 1 – Limites de intervalo adotados dos quatro parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (Fonte: Elaborada pelo Autor).

Parâmetros	Valor mínimo	Valor máximo
θ_s	0,10	0,99
θ_r	0,01	0,99
α	0,001	2
n	1	10

Os parâmetros da Tabela 1 foram variados (combinados) em cada uma das simulações efetuadas, para cada método de calibração pesquisado. Como são dois valores limites (mínimo e máximo) definidos para cada parâmetro e quatro parâmetros de estimação, tem-se que o número de testes de cada método foi de $2^4 = 16$.

Para o conteúdo de água saturada, θ_s , e para o conteúdo de água residual, θ_r , deve-se ter apenas valores positivos e menores de 1 (100%, valor de umidade máxima). Valores do conteúdo de água, seja na saturação seja residual, negativos ou maiores que 1 são fisicamente impossíveis e não podem ser considerados na avaliação dos resultados. Para o conteúdo de água saturada, θ_s , o valor mínimo adotado foi de 10% (0,10) e o máximo adotado, 99% (0,99). Para o conteúdo de água residual, θ_r , o valor mínimo adotado foi de 1% (0,01) e o máximo adotado, 99% (0,99).

Para o valor de α , deve-se ter valores positivos, já que valores negativos elevados a expoentes não inteiros retornam resultados inválidos. Já os valores de n também devem ser positivos, pois valores negativos proporcionam curvas de retenção crescentes, que não representa o comportamento entre potencial e umidade no solo.

O número de pontos dos dois solos estudados é pequeno para uma discussão estatística dos resultados. Assim, as melhores soluções de cada método foram avaliadas visualmente, comparando os valores dos parâmetros obtidos, por calibração manual, por Nichol *et al.* (2008) com os obtidos neste trabalho (calibração automática).

Simulação

Neste trabalho, foram utilizados seis métodos de calibração: Nelder-Mead, Newton-Raphson, Powell, Powell-híbrido (Dog Leg), Gradientes Conjugados e Levenberg-Marquardt.

As simulações foram feitas utilizando métodos de otimização da biblioteca SciPy (*Scientific Tools for Python*). Ela funciona no console dos comandos (Python Shell). É uma interface de comandos para o interpretador Python (licença GPL). O interpretador Python interpreta a linguagem de programação orientada a objetos de mesmo nome.

A seguir é apresentado o algoritmo desenvolvido no interpretador Python, para determinar os quatro parâmetros de ajuste do modelo de retenção de van Genuchten:

Início

Declarar o tipo de método de calibração utilizado

Declaração do conjunto de pontos experimentais da curva de retenção

Declaração do modelo de retenção de van Genuchten:

Declarar os valores obtidos por calibração manual dos parâmetros (Nichol *et al.*, 2008) para referência de erro entre os métodos de calibração automática

Declarar função objetivo (soma dos desvios quadráticos) como função de avaliação da calibração

Declarar os intervalos de busca de cada parâmetro de ajuste

Para cada valor dos intervalos dos parâmetros faça:

- 1) a chamada da função do método de calibração
- 2) escreva o número do teste
- 3) escreva os valores iniciais dos parâmetros
- 4) escreva os valores esperados dos parâmetros
- 5) escreva os valores obtidos pelo método para os parâmetros
- 6) escreva o tempo consumido na calibração
- 7) escreva o vetor de erros da calibração
- 8) escreva os erros esperados
- 9) escreva o número de chamadas do modelo

Fim do algoritmo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Calibração do modelo

Os resultados da calibração manual do modelo de van Genuchten (Nichol *et al.*, 2008), além da calibração automática pelo método de Nelder-Mead para os dois tipos de solos estudados, com os melhores ajustes, estão mostrados na Figura 1.

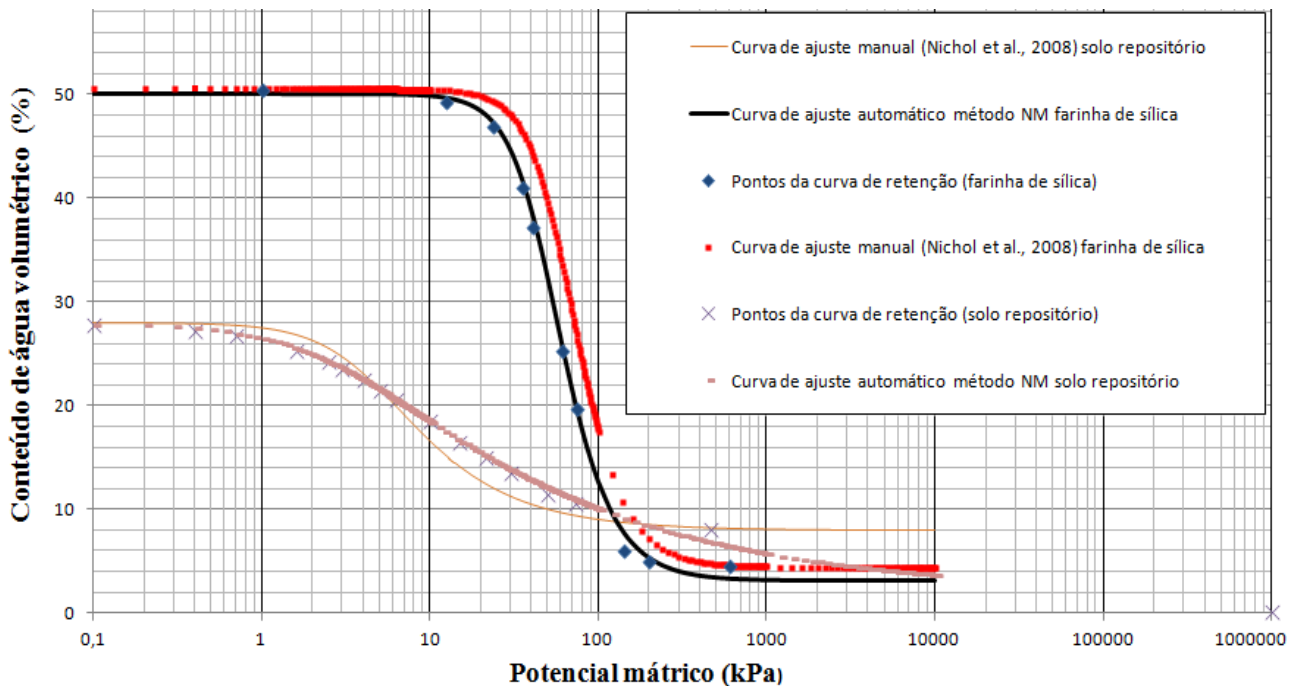


Figura 1. Curva de retenção de água no solo com os parâmetros ajustados de Nichol *et al.* (2008) – calibração manual - para farinha de sílica e solo repositório, além da calibração automática, método de Nelder-Mead (NM), para os dois tipos de solos. (Fonte: Elaborada pelo Autor)

Foram observados, pelos resultados da calibração do modelo, que:

- Para a farinha de sílica, sem restrições quanto aos parâmetros, os métodos de Nelder-Mead e Levenberg-Marquardt mostraram-se os de melhores ajustes, e os únicos cujos parâmetros resultaram em valores dentro dos limites inferior e superior definidos anteriormente.
- Para solo repositório (sem restrições), o método de Nelder-Mead mostrou-se o que proporcionou melhor ajuste, e o único cujos parâmetros resultaram em valores dentro dos limites inferior e superior definidos anteriormente.
- Pode-se concluir, de a) e b), que o método de Nelder-Mead é interessante em ambos os tipos de solos, quando não há restrições dos parâmetros do modelo.
- Para o solo repositório com restrições (os valores dos quatro parâmetros de ajuste sempre positivos), o método dos Gradientes Conjugados, utilizado neste caso, proporcionou um bom ajuste do modelo.
- Os métodos de Newton-Raphson e Powell-híbrido (Dog Leg) não forneceram resultados satisfatórios, em nenhum tipo de solo.

Análise de sensibilidade dos parâmetros de ajuste

Nesta análise, foram elaboradas duas tabelas (Tabela 2 e Tabela 3), para cada tipo de solo. Em cada tabela, é apresentada a relação entre o número de ocorrências de resultados idênticos para parâmetros e o número de ocorrências de soluções viáveis, de acordo com o método utilizado.

- Farinha de sílica

Foram quatro os métodos que forneceram resultados possíveis para a farinha de sílica: Nelder-Mead (N-M), Powell, Gradientes Conjugados e Levenberg-Marquardt (L-M). O método dos Gradientes Conjugados forneceu apenas um teste; deste modo, não é possível fazer a análise de sensibilidade dos parâmetros deste método. Os demais três métodos estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Número de ocorrências de resultados iguais obtidos em relação ao número de ocorrências de soluções viáveis, para farinha de sílica (Fonte: Elaborada pelo Autor).

Método	Parâmetro			
	θ_s	θ_r	α	n
N-M	7/12	8/12	7/12	7/12
Powell	4/6	3/6	4/6	4/6
L-M	5/8	5/8	4/8	5/8

No numerador, os números indicam os parâmetros de ajuste iguais. Já no denominador é mostrado o número de soluções viáveis, dentre os 16 testes para cada método de calibração testado.

Analisando a Tabela 2, observou-se que os quatro parâmetros de ajuste possuem uma sensibilidade semelhante com relação aos métodos de calibração, ou seja, cerca da metade dos resultados viáveis obtidos em cada método ocorreram quando os valores dos parâmetros de ajuste são iguais. Foi observado também que os parâmetros θ_s , conteúdo de umidade na saturação e n , expoente da carga mátrica, possuem sensibilidade idêntica para os três métodos de calibração viáveis.

- Solo repositório

Os dois métodos que forneceram resultados possíveis para o solo repositório foram Nelder-Mead (N-M) e Levenberg-Marquardt (L-M) (Tabela 3).

Tabela 3. Número de ocorrências de resultados iguais obtidos em relação ao número de ocorrências de soluções viáveis, para solo repositório (Fonte: Elaborada pelo Autor).

Método	Parâmetro			
	θ_s	θ_r	α	n
N-M	4/4	2/4	2/4	4/4
L-M	1/2	1/2	2/2	2/2

Analisando a Tabela 3, observou-se que no método Nelder-Mead, os parâmetros θ_s , conteúdo de umidade na saturação e n , expoente da carga mátrica, foram iguais em todos os testes viáveis, o que mostra que tais parâmetros são mais sensíveis do que os demais.

Já no método Levenberg-Marquardt, os parâmetros iguais foram α e n . Assim, pode-se concluir que o parâmetro n , de sensibilidade idêntica aos dois métodos viáveis, é o mais sensível de ajuste para o solo repositório.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados e no que foi observado na Figura 1, observou-se que o método de Nelder-Mead obteve menores resíduos de ajuste do modelo nos dois tipos de solos estudados, com qualidade de ajuste superior aos de calibração manual. Em alguns casos, os melhores resultados entre menor erro, menos tempo computacional e menor número de chamadas foram obtidos pelo método de Levenberg-Marquardt.

Na simulação com restrições dos parâmetros de ajuste, foi validada a existência de uma solução ótima dentro dos intervalos fisicamente possíveis dos parâmetros. Já os dois métodos que não forneceram resultados satisfatórios (Newton-Raphson e Powell-híbrido – Dog Leg) mostram que nem todos os métodos de calibração são adequados para este tipo de problema.

Na análise de sensibilidade (Tabela 2 e Tabela 3) foi observado que os parâmetros de umidade de saturação, θ_s , e o expoente da carga mátrica, n , são os decisivos para o sucesso da calibração.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor durante 14 meses.

REFERÊNCIAS

- BRAVO, J. M.; ALASSIA, D. G. P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. (2007). Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. In *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo, Novembro 2007.
- FREDLUND, D.G.; XING, A. (1994). Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31, pp. 521 – 532.
- GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. (2008). Simulação Hidráulica de Trincheiras de Infiltração de Águas Pluviais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 13(2), pp. 89 - 99.
- LIBARDI, P. L. (2005). *Dinâmica da água no solo*. 2ª ed. Edusp, Piracicaba - SP, 335 p.
- NICHOL, C. F.; ROWLETT, D. K.; BARBOUR, S. L. (2008). A New Standpipe Lysimeter Design for the Measurement of Soil Matric Suction. *Vadose Zone Journal* 7, pp. 919 - 929.
- QUEIROZ, J.E.; CRUCIANI, D.E.; LIBARDI, P.L. (1995). Estimativa da porosidade drenável de solo de várzea a partir da Tensão da água sem solo. *Scientia Agricola* 52(3), pp. 469 - 475.
- SCORZA JÚNIOR, R.P.; BOESTEN, J.J.T.I. (2005). Simulation of pesticide leaching in a cracking clay soil with the PEARL model. *Pest Management Science* 61(5), pp. 432 - 448.
- SCORZA JUNIOR, R. P.; SILVA, J. P. da; RIGITANO, R. L. de O. (2010). Simulation of moisture profiles in a Latossol in Dourados region, in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Engenharia Agricola* 30(1), pp. 22 - 32.
- SWANSON, D. A.; SAVCI, G.; DANZIGER, G.; MOHR, R. N.; WEISKOPF, T. (1999). Predicting the soil-water characteristics of mine soils. *Tailings and Mine Waste* 99, pp. 345 - 349.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. (2002). Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 26, pp. 305 - 314.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, pp. 892 - 898.
- VANAPALLI, S. K.; SILLERS, W. S.; FREDLUND, M. D. (1998). The Meaning and Relevance of Residual State to Unsaturated Soils. In: *Anais 51st Canadian Geotechnical Conference*, Edmonton, Alberta, Canada, October 4-7, 1998.