



CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE INFILTRAÇÃO DE GREEN E AMPT USANDO O MÉTODO SIMPLEX-MSX

CARLOS ALEXANDRE GOMES COSTA¹; DEBORAH MITHYA BARROS ALEXANDRE²;
JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO³; PEDRO HENRIQUE AUGUSTO MEDEIROS⁴

¹ Eng. Agrônomo, doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará (UFC) – costacag@gmail.com.

² Eng. Civil, doutoranda em Engenharia Agrícola pela UFC – deborahm_b@uol.com.br.

³ Professor Associado do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC – jcaraujo@ufc.br.

⁴ Eng. Civil, doutorando em Recursos Hídricos pela UFC – phamedeiros@gmail.com.

Escrito para apresentação no
XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola
2 a 6 de agosto de 2009 - Juazeiro-BA/Petrolina-PE

RESUMO: O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência do método Simplex-MSX na calibração dos parâmetros da equação de infiltração de Green-Ampt. Para isso utilizaram-se os dados obtidos em um Neossolo Flúvico no município de Pentecoste, Ceará. Os ensaios de infiltração foram realizados no campo com o cilindro infiltrômetro. A calibração automática foi realizada com a utilização do algoritmo Simplex-MSX utilizando como critério de parada o erro mínimo do conjunto de parâmetros. Para efeito comparativo utilizou-se também técnica manual de calibração do tipo tentativa e erro, consistindo, basicamente, em um processo iterativo em que o usuário altera os valores dos parâmetros do modelo a cada tentativa e compara os resultados calculados com os valores medidos. Além de calibrar os parâmetros através de números contínuos, o Simplex-MSX possibilitou a obtenção do mínimo da função objetivo com um sexto das iterações do método manual. Conclui-se que o método Simplex-MSX pode melhorar a calibração de parâmetros de equações como a de infiltração de Green-Ampt, permitindo obter o objetivo com mais precisão e menor número de iterações.

PALAVRAS-CHAVE: condutividade hidráulica, otimização não linear, Neossolo Flúvico.

PARAMETER CALIBRATION OF THE GREEN-AMPT INFILTRATION MODEL USING THE SIMPLEX-MSX ALGORITHM

ABSTRACT: The objective of this work is to assess the efficiency of Simplex-MSX method for the automatic calibration of the parameters of the Green-Ampt infiltration equation. Data obtained in a *Neossolo Flúvico*, in the municipality of Pentecoste, Ceará, Brazil, were used. The infiltration tests were carried out in the field with an infiltrometer cylinder. The automatic calibration was conducted using the Simplex-MSX algorithm with the minimum error of the parameters set as the criteria to stop the simulation. For comparative reason, a manual calibration technique was also used. The manual calibration is based on an iterative process in which the user changes the values of the model parameters and compares the results with measured data. Besides calibrating the parameters with continuous numbers, Simplex-MSX allowed to obtain the minimum of the objective function with one sixth of the iterations needed in the manual method in this work. It can be concluded that Simplex-MSX method improved considerably the calibration of the Green-Ampt parameters, presenting results closer to the observed values and using less iterations.

KEYWORDS: hydraulic conductivity, nonlinear optimization, *Neossolo Flúvico*.

INTRODUÇÃO: A infiltração de água no solo é um dos principais fenômenos componentes do ciclo hidrológico, pois é um dos fatores que determinam a disponibilização de água para as culturas, a recarga dos aquíferos subterrâneos, a ocorrência e magnitude do escoamento superficial. Portanto, o conhecimento da taxa de infiltração da água no solo é de fundamental importância para a definição de



técnicas de conservação do solo, de planejamento de sistemas de irrigação e drenagem, bem como para auxiliar no entendimento da retenção da água e aeração no solo. Green e Ampt desenvolveram em 1911 uma equação que representa uma das propostas que apresentam maior potencial de utilização, devido à sua simplicidade e por estar fundamentada no processo físico da infiltração, o que não ocorre com as equações empíricas. Entretanto, diversos autores, como Rodrigues e Pruski (1997), alertam para a necessidade de adequação dos parâmetros de entrada deste modelo para as condições de campo. O ajuste dos parâmetros de um modelo hidrológico é uma etapa que exige do usuário um grande entendimento do comportamento do modelo e dos parâmetros, dos problemas com a qualidade e a representatividade dos dados hidrológicos e a habilidade na busca da combinação adequada de parâmetros, que permitam não somente prever o período em estudo como, principalmente, o período de estimativa. De acordo com Collischonn e Tucci (2008), a calibração manual de modelos hidrológicos pode apresentar grande dificuldade, visto que o processo pode tornar-se muito lento e repetitivo, principalmente quando o modelo utilizado tem uma grande quantidade de parâmetros e o usuário é inexperiente. Para solucionar este problema, desde a década de 1960 têm sido desenvolvidas diferentes técnicas para a calibração automática de modelos hidrológicos. O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência do método Simplex-MSX na calibração automática dos parâmetros da equação de infiltração de Green-Ampt.

MATERIAL E MÉTODOS: Os dados utilizados neste trabalho foram fornecidos por Pereira (2007), que conduziu estudo com quatro ensaios de infiltração no período de janeiro a fevereiro de 2006 na área AT1 da Fazenda Experimental Vale do Curu, pertencente à Universidade Federal do Ceará – UFC, localizada no município de Pentecoste, Ceará. O solo do experimento foi classificado como Neossolo Flúvico, com relevo tipicamente plano, com predominância da fração areia, com textura franco-arenosa. Os ensaios foram realizados com o cilindro infiltrômetro, que consiste em dois cilindros de chapas com 50 e 25 cm de diâmetro, respectivamente, ambos com 30 cm de altura. Os cilindros foram instalados no solo até uma profundidade de 0,10 m, por intermédio de golpes sucessivos com uma vara de cano de duas polegadas, aplicados sobre a prancha de madeira apoiada sobre os cilindros de maneira que sua penetração fosse a melhor possível, com o objetivo de promover um perfeito contato do solo com suas paredes. As leituras de nível d'água e o tempo em que se fizeram as referidas medições foram anotadas e repetidas em intervalos de 1, 2, 5, 5, 10, 10, 15, 15, 30, 30, 30, 30 min. A equação proposta por Green e Ampt assume que durante o processo de infiltração existe uma carga hidráulica constante na superfície do solo e uma frente de umedecimento bem nítida e precisamente definida, acima da qual o solo se encontra uniformemente saturado com condutividade hidráulica saturada K , e que o potencial matricial (Ψ) nesta frente permanece igual ao valor do potencial matricial antes da infiltração. Foi assumido também que a água penetra no solo abruptamente, o que resulta na formação de duas regiões bem definidas, sendo a primeira completamente saturada e a segunda com conteúdo de umidade inicial. Chow et al. (1988) apresentam a equação de Green e Ampt para infiltração acumulada (Equações 1 e 2). A calibração manual foi realizada a partir dos valores fornecidos por Pereira (2007) e a técnica utilizada foi a de tentativa e erro. Tal técnica é considerada uma das pioneiras e consiste, basicamente, em um processo iterativo no qual o usuário altera os valores dos parâmetros do modelo a cada tentativa, compara os resultados calculados com os valores medidos e verifica se obteve uma melhor representação do sistema. O referido processo deve prosseguir até que o usuário encontre um conjunto de parâmetros mais apropriados para o processo simulado. Além de ser simples, este método utiliza valores discretos no processo de calibração, o que pode comprometer a qualidade da calibração. A calibração automática foi realizada com a utilização do algoritmo Simplex-MSX, proposto por Nelder e Mead (1965). É um dos mais eficientes para otimização de problemas que apresentam funções complexas ou com descontinuidades (Dixon, 1972). Collischonn e Tucci (2008) consideram-no um aperfeiçoamento de métodos de calibração porque o mesmo busca pelo melhor conjunto de parâmetros, iniciando por um grande número de pontos iniciais diferentes. A calibração automática utiliza critérios mais objetivos que os da calibração manual para definir o final do processo de calibração. Sorooshian e Gupta (1995)

apresentaram como critérios de parada a convergência dos valores dos parâmetros, o número máximo de iterações ou a convergência da função-objetivo, que foi utilizado neste trabalho. O Simplex-MSX é baseado na comparação dos valores da função objetivo de $n + 1$ vértices de uma simplex geral, que é a região no espaço n -dimensional na qual os vértices não são equidistantes. Uma vez definido um conjunto inicial de vértices e sua função objetivo, o método desloca esse conjunto (que forma uma figura geométrica no \mathbf{R}^n , em que “ n ” é o número de parâmetros a calibrar) no espaço \mathbf{R}^n em direção ao ótimo. Quando a região do ótimo estiver contida no conjunto, seu volume é reduzido, convergindo para o ponto de ótimo. Este processo é alcançado pela aplicação dos operadores: reflexão, contração e expansão (Figura 1) (SOROOSHIAN e GUPTA, 1995).

$$f(t) = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} \right) + 1 \dots (\text{equação 1})$$

$$F(t) = Kt + \psi \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right) \dots (\text{equação 2})$$

Em que: $f(t)$ é a taxa de infiltração ($L.T^{-1}$); K é a condutividade hidráulica do solo saturado ($L.T^{-1}$); $\Delta \theta$ é a variação da umidade do solo ($L^3.L^{-3}$); Ψ é o potencial matricial do solo na frente de umedecimento (L); e $F(t)$ é a infiltração acumulada

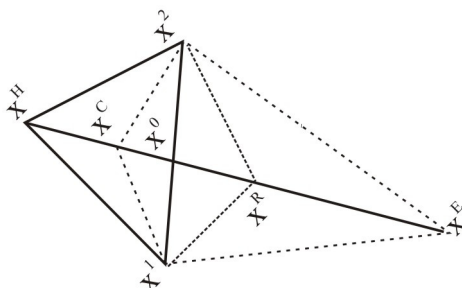


FIGURA 1 – Representação do algoritmo de busca direta Simplex MSX

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A calibração manual, realizada por tentativa e erro, resultou em 150 iterações até que se conseguisse um conjunto de parâmetros que simulasse adequadamente a infiltração medida. De acordo com a literatura, a calibração manual de modelos hidrológicos pode ser um processo muito lento, repetitivo e tedioso. Além disso, Fletcher e Ponnambalam (1998) citam que esta abordagem pode não ser recomendada em modelos complexos que envolvam um grande número de parâmetros. A Figura 2a apresenta a superfície de resposta resultante da calibração manual dos parâmetros K ($cm.h^{-1}$) e Ψ (cm). Em uma segunda etapa, realizou-se a calibração automática dos referidos parâmetros utilizando-se o Método Simplex-MSX. A superfície de resposta obtida com a calibração automática é apresentada na Figura 2b. É possível constatar que a superfície de resposta obtida pelo Método Simplex-MSX é mais suavizada devido à utilização de valores contínuos para sua obtenção, enquanto que no método manual são utilizados valores discretos. Além disso, o método reduziu a quantidade de iterações em um sexto em relação à calibração manual neste estudo, apesar de Quarteroni, Sacco e Saleri (2000) relatarem a possibilidade de dificuldade de convergência do Método Simplex-MSX devido à configuração inicial. Além do menor número de iterações necessárias, o Método Simplex-MSX apresentou erro menor da função objetivo em relação ao método manual, o que indica melhor calibração. A Tabela 1 exibe os resultados da calibração pelos dois métodos e o número de iterações necessárias para a convergência da função objetivo.

Tabela 1 – Comparação da calibração dos parâmetros e o número de iterações por método

Parâmetros	K ($cm.h^{-1}$)	Ψ (cm)	ϵ (erro da função objetivo)	Número de iterações
Calibração Manual	1,00	6,0	2.133	150
Calibração Automática	0,96	10,4	1.870	25

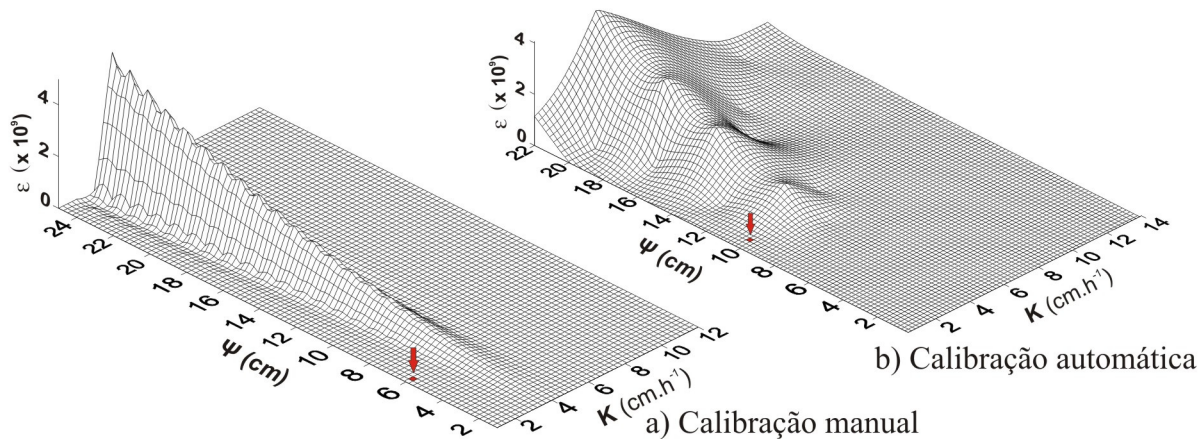


FIGURA 2 – Superfície de resposta do erro resultante da calibração dos parâmetros K e Ψ .

CONCLUSÕES: O presente trabalho permite concluir que a calibração automática dos parâmetros da equação de Green e Ampt, realizada através do Método Simplex-MSX, permitiu uma melhor calibração dos parâmetros, com menor erro da função objetivo, utilizando um número de iterações muito menor que aquele necessário na calibração manual. Esta, por sua vez, resultou em um trabalho tedioso, com uma enorme quantidade de iterações necessárias: 150 no total. Os parâmetros da equação de Green e Ampt para o Neossolo Flúvico de Pentecoste, Ce, são, segundo esta pesquisa: condutividade hidráulica saturada $0,96 \text{ cm.h}^{-1}$; e potencial matricial $10,4 \text{ cm}$.

REFERÊNCIAS

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill Book Co., 1988. 572p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/corpo docente/tucci/publicacoes/otimizaiph2.PDF>. Acesso: 24 set. 2008.

DIXON, L.C.W. Nonlinear optimization. The English Universities Press, London, 1972.

FLETCHER, S.G.; PONNAMBALAM, K. A constrained state formulation for the stochastic control of multireservoir systems. Water Resources Research 34(2), pp. 257-270, 1998.

NELDER, J.A.; MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. The Computer Journal, v.7, n.4 p.308-313. 1965.

PEREIRA, G.M. Análise comparativa de técnicas para estimativa da infiltração de água no solo em irrigação por superfície. Fortaleza: UFC, 2007. 71p. (Dissertação de Mestrado).

QUARTERONI, A.; SACCO, R.; SALERI, F. Numerical Mathematics. Spring-Verlag, New York, 2000.

RODRIGUES, L.N.; PRUSKI, F.F. Otimização do desempenho de sistemas de irrigação do tipo pivô central com o uso da equação de Green-Ampt. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 26, 1997, Campina Grande. Resumos... Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. CD-Rom.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K. Model calibration. In: SINGH, V. J. (editor) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, chapter 2, 1995.