

AJUSTE DA EQUAÇÃO DE HOLTAN MODIFICADA PARA UM SOLO BRUNO NÃO CÁLCICO DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA¹

José Vanglesio de Aguiar², Paulo Leonel Libardi³, Luis Carlos Uchôa Saunders²
e Vital Pedro da Silva Paz⁴

RESUMO

O estudo da infiltração da água no solo é de grande importância para o conhecimento da dinâmica da água no solo e a elaboração de modelos para o monitoramento da umidade no solo. O presente trabalho foi conduzido na Fazenda Experimental do Vale do Curu, pertencente à Universidade Federal do Ceará, localizada em região semi-árida, e teve como objetivo estudar a infiltração da água em um solo Bruno Não-Cálcico, utilizando-se a equação de Holtan modificada, cujo estudo consistiu na realização de testes de infiltração para obtenção da capacidade máxima de infiltração, infiltração em regime estacionário utilizando cilindros infiltrômetros e porosidade total do solo; foi determinada, também a velocidade de infiltração da água em função do conteúdo de água do solo e, a partir dos dados de velocidade de infiltração e umidade correspondente, foi ajustada uma equação de infiltração da forma $i=i_r+(i_0-i_r)[(\Theta_0-\Theta)/\Theta_0]^\alpha$. A equação ajustada foi: $i=17,5+(1128,2-17,5)[(0,2437-\Theta)/0,2437]^{1,4726}$ e pode ser utilizada sem se considerar a lâmina infiltrada e a profundidade de controle.

Palavras-chave: infiltração, taxa de infiltração, equação de infiltração

ADJUSTMENT OF MODIFIED HOLTAN EQUATION FOR A NON CALCIC BROWN SOIL OF A SEMI-ARID REGION

ABSTRACT

The study of the infiltration of water in the soil is of great importance for the knowledge of soil water dynamics and for the elaboration of models to monitor the moisture in the soil. The objective of this paper was to study the behavior of infiltration in a soil classified as Non Calcic Brown, at the Experimental Station of the "Universidade Federal do Ceará", using a modified Holtan equation. The study consisted of determining of the maximum infiltration capacity, constant infiltration capacity and total porosity of the soil. The infiltration rates, as a function of soil moisture data, were also obtained to adjust equation $i=i_r+(i_0-i_r)[(\Theta_0-\Theta)/\Theta_0]^\alpha$. The following equation has been obtained: $i=17,5+(1128,2-17,5)[(0,2437-\Theta)/0,2437]^{1,4726}$, which may be used to predict the infiltration rate without considering the accumulated infiltration and the depth.

Key words: infiltration, infiltration rate, infiltration equation

¹ Parte da tese de doutorado apresentada pelo primeiro autor à ESALQ/USP

² Professor Doutor do Departamento de Eng. Agrícola, UFC, Campus do Pici, Bloco 804, Fortaleza, CE, CEP 60455-700, E-mail: jvaguair@ufc.br e lcuasund@ufc.br Fone (085)288-9758 Fax 288-9756

³ Professor Titular do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, E-mail: pllibard@carpa.ciagri.usp.br. Fone (019)429-4123

⁴ Engenheiro Agrícola, Doutor em Irrigação e Drenagem, ESALQ/USP-FAPESP, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, E-mail: vpspaz@carpa.ciagri.usp.br. Fone (019)429-4217, Fax 433-0934

INTRODUÇÃO

O conhecimento da infiltração da água no solo é muito importante no manejo da irrigação, na avaliação de perdas por enxurrada e no estudo de problemas de drenagem. Vários fatores influem na velocidade de infiltração da água, podendo-se citar as propriedades físicas do solo (textura, estrutura, porosidade), o conteúdo inicial de água e o tempo de infiltração.

Uma das equações mais simples para se descrever o processo de infiltração, foi proposta por Kostiaikov (1932) e apresenta seguinte forma:

$$i = i_0 \cdot t^{-b} \quad (1)$$

em que t é o tempo decorrido após o início da infiltração, i_0 é a velocidade no início da infiltração, isto é, $t = 0$ e b é uma constante que depende das características e das condições iniciais de umidade do solo, variando de 0 a 1. Embora seus parâmetros não tenham significado físico, são de grande aceitação, em virtude da sua facilidade de ajuste à maioria dos dados (Skaggs & Khaeel, 1988).

Esta equação não se adapta bem a tempos muito longos, para os quais prevê i tendendo para zero quando, na prática, a medida em que t aumenta, i diminui, tendendo para um valor constante. Por isso, alguns pesquisadores têm utilizado a equação de Kostiaikov modificada, adicionando o termo $C.t$ ao segundo membro da equação original, em que C é a condutividade hidráulica do solo saturado e b assume um valor igual a 0,5.

O modelo formulado por Horton (1940) baseia-se na teoria do decaimento, na qual a taxa de variação de uma grandeza em direção a um valor constante decresce a medida em que o seu valor atual se aproxima desse valor constante. Tem-se que:

$$i = i_f + (i_0 - i_f) \cdot e^{-Kt} \quad (2)$$

em que i é a velocidade de infiltração decorrido o tempo t , i_f é a velocidade de infiltração básica, i_0 é velocidade de infiltração inicial ($t=0$), K é uma constante relacionada às características do solo e que determina o tempo necessário para i atingir o valor de i_f partindo do seu valor inicial. Uma vantagem da equação de Horton é que i tende para i_f quando t tende para o infinito.

Utilizando um modelo aproximado dos postulados de Darcy, Green & Ampt (1911) propuseram uma equação derivada da infiltração da água em uma superfície com carga hidráulica constante, em um solo homogêneo, com conteúdo inicial de água uniforme. O modelo de Green & Ampt assume a existência de uma frente de molhamento, a qual separa uma zona úmida que avança de uma zona totalmente seca. O modelo é representado pela equação:

$$i = A [1 + B(h + W)] \quad (3)$$

sendo W a carga hidráulica acima da superfície, h é o potencial mátrico na frente de molhamento e A e B são constantes que dependem do tipo de solo.

A partir da equação de Richards, Philip (1957) desenvolveu uma técnica numérica para determinação da velocidade de infiltração, como uma série infinita de termos em potência de

$t^{1/2}$, em que o coeficiente de cada termo é dependente da difusividade e da capacidade de retenção da água no solo. Este modelo é dado pela seguinte expressão:

$$i = 0,5 \cdot S \cdot t^{1/2} + C \quad (4)$$

sendo S e C dependentes do conteúdo de água no solo.

Uma equação bastante utilizada para determinar a capacidade de infiltração é a de Holtan (Holtan et al., 1967) cuja forma original é:

$$i = a(S-F)^n + f_c \quad (5)$$

em que f é a capacidade de infiltração, S é o armazenamento potencial do solo acima da camada impermeável, F é a infiltração acumulada, f_c é a infiltração na condição de regime estacionário, e a e n são parâmetros que dependem do solo e da sua cobertura. Huggins & Monke (1967) citados por Skaggs et al. (1969) modificaram a equação original para

$$f = D[(S-F)/TP]^n + f_c \quad (6)$$

sendo D o maior aumento possível na taxa de infiltração acima da condição de regime estacionário, TP é a porosidade total acima da camada impermeável e $n=1,4$.

A modificação proposta consiste em se calcular i para qualquer camada, independente desta ser ou não impermeável e se considerar o cálculo de i sempre com base na umidade antecedente; esta alteração facilita a determinação da taxa de infiltração, uma vez que a maior dificuldade em se trabalhar com a equação de Holtan é a determinação da profundidade de controle, que serve de base para o cálculo de TP e S (Skaggs et al., 1969)

Mais recentemente, os modelos matemáticos têm apresentado avanço considerável no estudo da infiltração da água no solo.

O método das diferenças finitas tem sido descrito por Rubin (1968), Amerman (1969) e Freeze (1971), citados por Skaggs e Khaeel (1988). A aplicação desta técnica vem sendo aplicada com mais ênfase nos problemas que envolvem a infiltração em solos de geometria simples e consiste no estudo da infiltração, considerando-se o solo perfeitamente dividido em camadas, para formular a solução da equação de Richards para o fluxo vertical.

Outro procedimento numérico com aplicação mais generalizada foi sugerido por Whisler & Klute (1965) usando uma forma iterativa para resolver a equação do fluxo, para um conteúdo inicial de água não uniforme, em solos estratificados de profundidade arbitrária.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da infiltração da água em um solo Bruno Não Cálcico, propondo-se uma modificação na equação de Holtan (1967) que dispensa a lâmina infiltrada e a profundidade de controle no cálculo da velocidade de infiltração.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em área da Fazenda Experimental do Vale do Curu, pertencente à Universidade Federal do Ceará, entre os paralelos 3° 45' e 3° 50' de latitude sul, no município de Pentecoste, a 115km de Fortaleza; o clima da região é do tipo semi-árido, com precipitação média em torno de 750mm anuais

e temperatura média de 27°C, enquanto o solo utilizado foi um Bruno Não-Cálcico, de textura arenosa no horizonte A_p e argilosa no horizonte B_t, com declive de 0 a 3%.

A equação proposta e ajustada foi do tipo:

$$i = i_f + (i_o - i_f) [(\Theta_o - \Theta)/\Theta_o]^\alpha \quad (7)$$

sendo i a velocidade de infiltração em mm/dia, i_o a capacidade máxima de infiltração em mm/dia, i_f é a velocidade de infiltração quando o perfil alcançou a condição de saturação até a profundidade de 100cm, em mm.dia⁻¹, Θ_o é a umidade de saturação em cm³.cm⁻³, Θ a umidade residual do solo em cm³.cm⁻³ e α uma constante que exprime a inclinação da forma linearizada da função.

Na determinação de i_o e i_f foi utilizado um par de cilindros infiltrômetros com 30 e 60cm de diâmetro, enterrados no solo até 10cm, com uma carga hidráulica constante de 10cm de água, no cilindro interno. Nos meses mais secos do ano (set/out) foram feitos 3 testes de infiltração, em 6 sub-áreas de 16m² cada uma e, através da forma integralizada da função de Kostiakov ($Z = K.t^n$), determinou-se a e K , sendo este considerado como sendo a infiltração acumulada no primeiro minuto do teste e numericamente igual à velocidade de infiltração no primeiro minuto (i_o); o valor de i_f correspondeu à velocidade de infiltração quando esta atingiu valor constante em condições de saturação do solo.

Para determinação do valor de i_o integralizado, foi calculada a lâmina infiltrada para $t=1,0$ dia, utilizando-se a função de Kostiakov na sua forma integralizada. A partir da condição de umidade mais baixa possível, novos testes foram realizados para se medir a velocidade de infiltração no primeiro minuto e a umidade correspondente, na camada superficial, para diversas condições de umidade, até a saturação do solo. Os valores da umidade foram determinados por gravimetria. Com os dados de i e Θ , plotou-se um gráfico de $\log(i-i_f)$ versus $\log[(\Theta_o - \Theta)/\Theta_o]$ determinando-se a , por regressão linear, utilizando-se o método dos mínimos quadrados.

Uma vez determinados os parâmetros i_o , i_f , e a , a Eq. (7) foi testada no monitoramento da umidade do solo estudado conforme Aguiar(1997), comparando-se o armazenamento medido diariamente, no período de 11/02/95 a 30/06/95, com uma sonda de neutrons, com o armazenamento estimado pela Eq. (8) para o intervalo de um dia.

$$Arm_f = Arm_i + I + Q - E \quad (8)$$

$$R = P - I \quad (9)$$

em que Arm_f e Arm_i são os armazenamentos final e inicial do solo no intervalo de um dia, respectivamente, I é o volume infiltrado, Q é o volume percolado, E é o volume evaporado, uma vez que o solo foi mantido sempre sem vegetação, R é o volume escoado e P é a precipitação ocorrida durante um dia.

As variáveis percolação e evaporação foram avaliadas com base nas características do solo e na quantidade de água disponível em determinado momento, de acordo com as equações:

$$q = i_f (\Theta/\Theta_o)^\beta \quad (10)$$

$$Er = Etp (\Theta/k.\Theta_o)^\gamma \quad (11)$$

sendo q a drenagem interna em mm/dia, i_f a capacidade máxima de percolação profunda, Θ o estado atual de umidade em cm.cm⁻³, Θ_o a umidade de saturação em cm.cm⁻³, Er a evaporação real, em mm.dia⁻¹, Etp a evapotranspiração potencial, em mm.dia⁻¹, k um coeficiente cujo valor varia de 0 a 1 e indica em que umidade do solo já ocorre a evapotranspiração em nível potencial e β e γ parâmetros indicativos da variabilidade de q e Er com a umidade.

A função de infiltração é representada pela equação de Holtan modificada (12).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O parâmetro i_o , associado à capacidade de absorção de água pelo solo, variou entre 1017 a 1284mm/dia, (Tabela 1) com valor médio de 1128mm.dia⁻¹, próximo ao encontrado por Israelsen & Hansen (1965) para solos arenosos (1291mm.dia⁻¹) enquanto i_f alcançou o baixo valor de 17,5mm.dia⁻¹, tendo em vista uma camada de retardamento existente próximo à profundidade de 40cm, reduzindo o fluxo na camada superior, quando a frente de molhamento alcançava aquela profundidade sendo, portanto, determinante do fluxo. As divergências encontradas entre os valores de i_o e b devem-se, em parte, aos diferentes intervalos de tempo utilizados nos testes de infiltração; a amplitude de i_o foi de 26,2% e de b alcançou 13,0% (Tabela 1) valores relativamente baixos, considerando-se a alta variabilidade espacial das características físicas da maioria dos solos. Os valores de a variaram de 0,7789 a 2,3143, sendo que 71,4% ficaram entre 1,0 e 2,0, obtendo-se o valor médio de 1,4726, enquanto Holtan et al. (1967) adotando este critério, encontraram 1,387 para vários tipos de solo.

Tabela 1. Capacidade máxima de infiltração (i_o), constante da Equação de Kostiakov (b) e declividade da equação de Holtan modificada (α)

Parâmetros	Sub-área					
	1	2	3	4	5	6
i_o	1284	1128	1057	1063	1221	1017
b	0,6630	0,7012	0,7677	0,7275	0,6814	0,7492
α	2,0010	2,1343	1,0040	0,7789	1,8650	1,0525

Holtan & Creitz (1969) citados por Skaggs et al.(1969) sugerem que α pode ser tomado como uma constante igual a 1,4 para todos os tipos de solo; assim, o valor de α encontrado no presente trabalho está de acordo com valores encontrados por outros pesquisadores. A equação de infiltração ajustada foi, portanto:

$$i = 17,5 + (1128,2 - 17,5) [(0,2437 - \Theta)/0,2437]^{1,4726} \quad (12)$$

considerando-se a camada de 0 a 20cm, sendo i dado em mm.dia⁻¹ e Θ em cm³.cm⁻³.

A Equação 12 mostra que o aumento da velocidade de infiltração ocorre a taxas elevadas para pequenas variações na umidade, a partir do estado de saturação e vai, gradativamente, reduzindo. Verifica-se, por exemplo, que uma redução de 5% na umidade corresponde a um aumento de 77% na taxa de infiltração, mantendo-se esta variação aproximadamente

constante, em torno de 10%, quando a variação percentual da umidade atinge valores próximos de 17% (Figura 1).

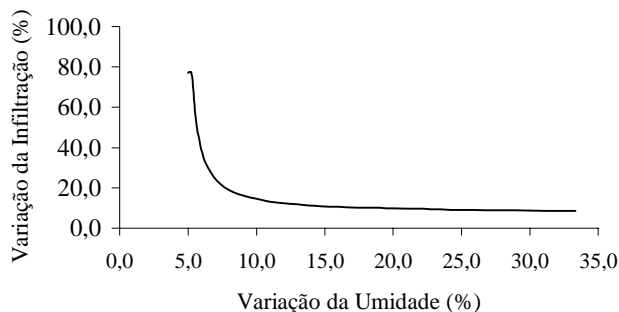


Figura 1. Variação percentual da taxa de infiltração em função da variação percentual da umidade a partir do estado de saturação

A análise estatística revelou diferença nula entre a média do armazenamento medido e a média do armazenamento estimado pela Eq.(8) (Tabela 2) tendo o teste “t” calculado o valor de 0,63 abaixo do valor tabulado (2,58) para o nível de significância adotado de $\alpha = 0,01$.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros da avaliação estatística do MUSAG no período de 11/2 a 30/06/95. Pentecoste - CE

Camada (cm)	Aest (mm)	Aobs (mm)	σ	σ_r	r	Cs	Cr	“t”
0-20	30,48	29,82	8,04	0,24	0,64	0,01	-1,21	0,63
0-40	72,43	65,59	16,95	0,26	0,58	-0,12	-1,23	3,86
0-60	3,80	93,24	10,86	0,10	0,73	-0,51	-0,98	0,39
0-80	173,8	177,9	18,73	0,09	0,90	-0,14	-1,27	1,14
0-100	205,4	211,6	25,35	0,11	0,85	-0,44	-1,39	1,52

Aest: Armazenamento estimado
Aobs: Armazenamento observado
 σ : Desvio padrão
 σ_r : Desvio relativo

r: Coeficiente de correlação
Cs: Coef.de assimetria
Cr: Coef.de curtose
“t” Tabelado - 2,58

CONCLUSÕES

1. A utilização do valor $\alpha=1,4726$ mostrou-se consistente com os resultados experimentais dos testes de infiltração, para o tipo de solo estudado.

2. A utilização da Equação de Holtan modificada da forma proposta, pode ser utilizada sem considerar a lâmina infiltrada e a profundidade de controle na qual é baseado o valor de TP e S, com uma boa margem de precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, J.V. **Avaliação do “Modelo de Umidade do Solo para Atividades Agrícolas” (MUSAG) para um solo sem cobertura vegetal**. Piracicaba: ESALQ. 1997. 93p. Tese Doutorado
- GREEN, W.H.; AMPT, G. Studies of soil physics. Part. I. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.4 p.1-24, 1911.
- HOLTAN, H.N.; ENGLAND, C.B.; SHANHOLTZ, V.O. Concepts in hydrologic soil grouping. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.10, n.5, p.407-410, 1967.
- HORTON, R.E. An approach toward physical interpretation of infiltration capacity. **Soil Science Society of America Proceedings**. Madison, v.4, p.399-417, 1940.
- ISRAELSEN, R.W.; HANSEN, V.E. **Principios y aplicaciones del riego**. Barcelona: Reverté, 1965. 396p.
- KOSTIAKOV, A.N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. In: Comm. Intern. Part A, 6th, Russian, 1932. **Transactions Russian Soil Science Society**, Moscow, 1932, p.17-21.
- PHILIP, J.R. The theory of infiltration. 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, Baltimor, v.84, p.257-264, 1957.
- SKAGGS, R.W.; HUGGINS, L.E.; MONKE, E. J.; FOSTER, G.R. Experimental evaluation of infiltration equations. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.12, n.6, p.822-828, 1969.
- SKAGGS, R.W.; KHAEEL, R. Infiltration. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF MODELLING AGRICULTURAL FOREST AND RANGELANDS HYDROLOGY, Chicago, 1988. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1988. p.1-9, 1988.
- WHISLER, F.D.; KLUTE, A. The numerical analysis of infiltration, considering hysteresis, into a vertical soil column at equilibrium under gravity. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.29, p. 489-494, 1965.