

RELAÇÃO ENTRE A EVAPORAÇÃO E A UMIDADE DE UM SOLO BRUNO NÃO CÁLCICO SEM VEGETAÇÃO, EM CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS¹

THE SOIL MOISTURE AND THE WATER EVAPORATION FROM A BRUNEI NON CALCIC BARE SOIL, AT SEMIARID CONDITIONS¹

José Vanglesio de Aguiar², Luiz Roberto Angelocci³ e Marcus Vinicius Folegatti³

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar a evaporação da água em um solo Bruno Não Cálculo, em uma área da Fazenda Experimental da Universidade Federal do Ceará, a partir de uma equação utilizada na operacionalização do “Modelo de Umidade do Solo para Atividades Agrícolas”(MUSAG) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). O modelo relaciona a evaporação real (E_r) com a umidade do solo na forma: $E_r = E_{tp} (\Theta/k.\Theta_0)^\alpha$, sendo E_{tp} a evapotranspiração potencial, Θ a umidade do solo, Θ_0 a umidade de saturação, k um coeficiente e α um parâmetro indicativo da variação de E_r com a umidade do solo. O estudo foi desenvolvido para as profundidades de 20, 40, 60, 80 e 100cm, ajustando-se uma equação para cada profundidade. A evapotranspiração potencial foi determinada a partir de um tanque Classe A, Θ_0 diretamente no campo e os parâmetros k e α por regressão linear, onde os valores de Θ foram obtidos com uma sonda de neutrons e os valores de E_r , através do balanço hídrico para os dias sem chuva. As equações ajustadas foram utilizadas na avaliação do MUSAG, obtendo-se resultados satisfatórios para todas as profundidades, com exceção de 40cm.

Palavras-chave: evaporação, umidade do solo, estimativa da evaporação.

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

² Eng^o.Agr^o, Doutor, Professor adjunto do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 804, CEP 60455-700, Fortaleza, CE. Fone (085)288.9758, fax (085)288.9756. E-mail:jvaguair@ufc.br.

SUMMARY

The objective of this work was to study the evaporation from a brunei non calcic soil, at the Experimental Farm of Universidade Federal do Ceará (Fortaleza-Brazil), using an equation belonging to the “Model of Soil Moisture for Agricultural Activities” (MUSAG), from FUNCEME. This equation relates evaporation to soil moisture and can be written as $E_r = E_{tp} (\Theta/k.\Theta_o)^\alpha$ where E_{tp} is potential evapotranspiration (mm/day), Θ is soil moisture level ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Θ_o is the saturation moisture ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), k is a coefficient ranging from 0.0 at 1.0, and indicates the soil moisture level in which potential evaporation is occurring and α is a parameter indicating as E_r varies with soil moisture. The study was done for 20, 40, 60, 80 and 100cm depths, with an equation adjusted for each one of the depth. The reference evaporation was determined with a Class “A” evaporation pan, Θ at field conditions, k and α by linear regression, Θ by neutron probe and E_r by soil water balance for no raining days. The adjusted equations were used to evaluate the MUSAG, with good results, except for the 40cm depth.

Key Words: evaporation, soil moisture, evaporation equation.

INTRODUÇÃO

Na região do semi-árido nordestino os déficits hídricos ocorrem com bastante frequência colocando em risco a produção das culturas anuais, grande parte em regime de sequeiro. No Estado do Ceará, exceto às áreas litorâneas e a região do Cariri, as precipitações médias anuais são inferiores a 800mm, enquanto a evapotranspiração potencial varia de 1500 a 1800mm anuais (SILVA, 1987).

O cálculo da evaporação da água do solo envolve muitas dificuldades. A variação da evaporação se constata tanto do ponto de vista espacial como temporal; em cada ponto de uma determinada área a evaporação apresenta valores diferentes ao longo do dia.

Para a determinação da evaporação da água do solo, existe um grande número de métodos de diferentes complexidades, envolvendo desde medidas diretas até a utilização de fórmulas empíricas ou

³ Eng^o Agr^o, Doutor, Professor associado da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”(ESALQ), Av. Pádua Dias,11 CEP 13418-900, Piracicaba-SP. Fone (019)4294217, fax (019)433-0934. E-mail: lrangel@carpa.ciagri.usp.br e mvfolega@carpa.ciagri.usp.br, respectivamente. Bolsistas do CNPq

semi-empíricas. Para a medida da evaporação tem sido utilizados tanques de evaporação, lisímetros, balanço de massas no solo; embora tais medidas possam dar bons resultados, nem sempre é possível a sua realização na maioria das regiões semi-áridas. A utilização de fórmulas, em geral, depende de dados relacionados à temperatura, radiação solar, umidade, velocidade do vento, insolação, coeficientes de rugosidade, nem sempre disponíveis (AL-SHA'LAN & SALIH, 1987).

A evaporação da água em um solo não vegetado, pode ser estimada com a utilização da equação do fluxo não saturado, numa só dimensão, sob condições isotérmicas num perfil homogêneo e com umidade inicial uniforme e, segundo a equação (BLACK et al., 1969):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial z}]. \quad (1)$$

sujeita às condições:

Para $\Theta = \Theta_i$, $z \geq 0$ e $t = 0$;

Para $\Theta = \Theta_s$, $z = 0$ e $t > 0$,

onde Θ_i é o conteúdo inicial de água, constante para $t = 0$ e $z \geq 0$; Θ_s o conteúdo de água em $z = 0$, constante para $t > 0$, z a profundidade e $D(\Theta)$ a difusividade da água no solo, mostrando que a umidade do solo, além da disponibilidade de energia e da natureza da interface solo-ar, influi no fluxo de água do solo para a atmosfera.

O objetivo do presente trabalho, foi ajustar uma função de evaporação para um solo bruno não cálcico, em uma região semi-árida, usando a umidade como variável independente, e testá-la em condições de campo, com dados obtidos a partir do balanço hídrico do solo, para as profundidades de 20, 40, 60, 80 e 100cm.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida de 11/02/95 a 30/06/95 na área da Fazenda Experimental do Vale do Curu (FEVC), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, no município de Pentecoste, em região de clima semi-árido, com temperatura média do ar da ordem de 27°C e precipitação média de 750mm anuais (SILVA, 1987).

O solo da área pertence à Unidade Serrote Grande com declive de 0 a 3%, moderadamente drenado, vegetação do tipo caatinga hiperxerófila; classificado como Bruno não Cálcico, raso, com uma

seqüência de horizontes A_p , arenoso e B_t argiloso (Tabela 1), representando 17,9% dos solos do Estado do Ceará, ocupando a terceira maior área de ocorrência.

A área delimitada para a pesquisa foi de 80m x 120m, praticamente plana, mantida sem vegetação durante todo o período experimental, tendo sido cultivada nos últimos cinco anos com culturas anuais, predominantemente o caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp).

A relação entre a evaporação e a umidade do solo foi obtida a partir de uma equação ajustada com dados experimentais, do tipo:

$$E_r = E_{tp} (\Theta/k.\Theta_o)^\alpha \quad (2)$$

para $0 \leq \Theta \leq k.\Theta_o$; para $\Theta \geq k.\Theta_o$, considera-se que a evaporação esteja ocorrendo na condição potencial, isto é, $E_r = E_{tp}$, sendo E_r a evaporação real em mm/dia; E_{tp} a evapotranspiração potencial, em mm/dia; Θ a umidade do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; Θ_o a umidade de saturação, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; k é um coeficiente cujo valor varia de 0 a 1,0 e indica até que percentual da umidade de saturação ainda ocorre a evaporação em nível potencial; e α é um parâmetro indicativo de como E_r varia, quando varia a umidade do solo (ANDRADE, 1995).

Os valores de E_r foram obtidos através do balanço hídrico nos 63 dias sem chuva segundo a equação:

$$E = \text{Arm}_{i-1} - \text{Arm}_i - Q \quad (3)$$

onde Arm_i é o armazenamento na camada considerada no dia i , Arm_{i-1} o armazenamento da camada considerada, no dia $i-1$ e Q o volume da drenagem interna, calculada em condições de campo.

Os dados de umidade do solo foram determinados diariamente com o uso de uma sonda de neutrons TROXLER Série 3300, em oito tubos de acesso, calibrada para o solo em questão e os respectivos armazenamentos até a profundidade de 100cm, foram calculados pelo método de integração numérica de Simpson (LEITHOLD, 1986).

A drenagem interna q (mm/dia) foi obtida pela equação de Darcy:

$$q = K(\Theta) (\partial\Psi/\partial\Theta) \quad (4)$$

onde a condutividade hidráulica $K(\Theta)$ foi determinada pelo método de LIBARDI et al. (1980) e os gradientes de potencial $(\partial\Psi/\partial\Theta)$ através de 8 (oito) baterias de 6 (seis) tensiômetros cada, nas profundidades de 10, 30, 50, 70, 90 e 110cm.

Tabela 1 - Análise granulométrica e características físicas de um solo Bruno não cálcico na profundidade de 0 - 100cm. Pentecoste - Ce. 1995

Horizonte	Camada (cm)	Areia Grossa (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Densidade global	Umidade 1/3 atm (%)	Umidade 15 atm (%)
Ap	0 - 20	40	42	7	11	1,51	9,1	2,4
Ap	20 - 40	34	23	13	30	1,55	19,6	10,6
Bt	40 - 60	26	16	18	40	1,63	23,7	12,6
Bt	60 - 80	31	20	18	31	1,67	21,2	12,6
Bt	80 - 100	33	18	19	30	1,58	20,9	10,8

Os valores da evapotranspiração potencial (Etp) foram estimados com a utilização de um tanque Classe “A” instalado no local, multiplicando-se o valor da evaporação do tanque pelo coeficiente de tanque obtido em função das condições de umidade relativa, velocidade do vento e condições de exposição do tanque, observados na área. Considerando que o vento não atingiu em nenhum dia a velocidade de 175km/dia, que a bordadura adotada foi de 100m e a umidade relativa sempre esteve entre 40 e 70%, adotou-se um coeficiente de tanque único de 0,8 (DORENBOOS & PRUITT, 1977).

Para obtenção dos parâmetros α e k da equação (2), plotou-se os dados de $\log E$ x $\log (\Theta/\Theta_0)$ para as profundidades de 20, 40, 60, 80 e 100cm e utilizando-se a técnica da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, obteve-se a equação:

$$\log E = \log (E_{vp}/ k^\alpha) + \alpha \log (\Theta/\Theta_0) \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evapotranspiração potencial ao longo de cinco meses, alcançou uma média de 3,67 mm/dia, enquanto as média mensais variaram de 2,33 a 4,78mm/dia. A evaporação do tanque apresentou valores mínimos no mês de abril e maio (2,33 e 3,40mm/dia, respectivamente), devido à redução da irradiância global, do déficit de saturação do ar e, em consequência, dos gradientes de concentração de vapor d'água entre o ar e a superfície evaporante, coincidindo também com os meses de maior precipitação.

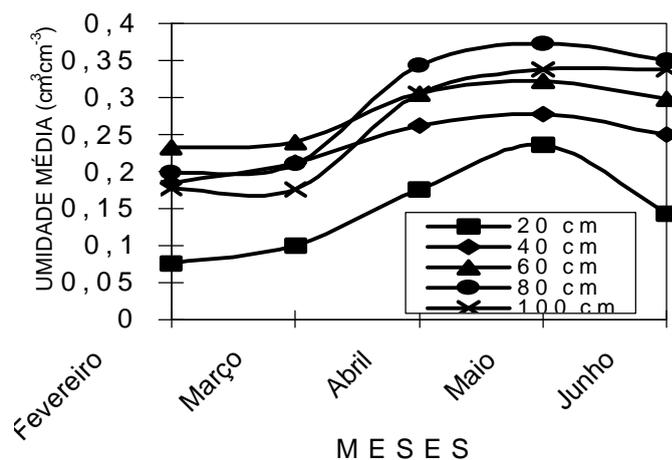


Figura 1 – Conteúdo de água mensal no solo no período de 11/02/95 a 30/06/95.

As equações ajustadas para as diversas profundidades foram:

$$20\text{cm: } E = 3,67 (\Theta/0,9055 \cdot 0,2437)^{2,8742} \quad (6)$$

$$40\text{cm: } E = 3,67 (\Theta/0,9845 \cdot 0,2818)^{6,2045} \quad (7)$$

$$60\text{cm: } E = 3,67 (\Theta/1,0 \cdot 0,3258)^{4,3856} \quad (8)$$

$$80\text{cm: } E = 3,67 (\Theta/1,0 \cdot 0,3795)^{2,5352} \quad (9)$$

$$100\text{cm: } E = 3,67 (\Theta/1,0 \cdot 0,3450)^{3,868} \quad (10)$$

Analisando a variação da umidade do solo no tempo, vê-se que partindo de condições iniciais de baixa umidade (Figura 1), à medida que novas precipitações ocorreram, todas as camadas aumentaram o conteúdo de água; entretanto, o coeficiente de variação da camada de 0 a 20cm cresceu, enquanto para as demais camadas houve uma menor variabilidade da umidade do solo, quando este estava mais úmido; este fato pode ser explicado pela maior velocidade de extração de carga e recarga de água nas camadas superficiais. Enquanto na camada de 0 a 20cm, a variação da umidade entre o nível mais baixo e o mais alto foi de 209,6% (0,0763 a 0,2362cm³ cm⁻³), nas demais a variação média foi de 70,2% (0,1957 a 0,3330cm³ cm⁻³). De acordo com os critérios expostos por WARRICK & NIELSEN (1980), citados por LIBARDI et al. (1996), as camadas de 0 a 40cm apresentaram uma variação média (12% < cv < 60%) e além de 40cm, variação baixa (cv < 12%).

Observando o armazenamento ao longo do experimento, nota-se que a diminuição da umidade a partir da saturação das camadas abaixo de 40cm, ocorre bem mais lentamente do que nas camadas superiores, sugerindo a existência de uma camada de retardamento a essa profundidade. Isso está de acordo também com a variação da textura; entre 40 e 60cm existe o maior teor de argila e entre 40 e 80cm a densidade global tem os máximos valores do perfil.

O valor de k nas equações ajustadas aumentou com a profundidade (Figura 2), evidenciando que a camada superficial governa o fluxo evaporativo, já que este permaneceu na condição potencial a uma fração menor da umidade de saturação, em relação às camadas mais profundas. O seu valor próximo de 1,0 para as camadas de 20 e 40cm (0,9045 e 0,9845 respectivamente), mostra que nas condições climáticas estudadas, o estágio em que a taxa de evaporação foi constante com o tempo, é de curta duração, isto é, a influência isolada dos elementos meteorológicos (radiação solar, temperatura, déficit de saturação, vento) na intensidade do fluxo evaporativo, ocorreu em um tempo bastante reduzido.

A partir do momento em que a evaporação sai da condição de potencial, as características do solo limitaram a taxa de evaporação, reduzindo-a drasticamente, pela baixa capacidade das camadas inferiores no suprimento de água para a superfície evaporante, conforme a Figura 2.

A condutividade hidráulica para as camadas de 40 a 100cm (Equações 11, 12, 13 e 14), é praticamente desprezível quando a umidade do solo se reduz a menos de 85% da umidade de saturação, enquanto para a profundidade de 20cm, esse percentual cai para 66%.

$$40 \text{ cm: } k(\Theta) = 1,91 \exp [104,41 (\Theta - \Theta_o)] \quad (11)$$

$$60 \text{ cm: } k(\Theta) = 4,25 \exp [172,93 (\Theta - \Theta_o)] \quad (12)$$

$$80 \text{ cm: } k(\Theta) = 2,06 \exp [242,34 (\Theta - \Theta_o)] \quad (13)$$

$$100 \text{ cm: } k(\Theta) = 1,10 \exp [107,55 (\Theta - \Theta_o)] \quad (14)$$

Estas equações foram utilizadas por AGUIAR (1997) na avaliação do “Modelo de umidade do solo para atividades agrícolas” (MUSAG), adotado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) na estimativa da umidade do solo, cuja análise estatística para o ano de 1995 revelou uma diferença nula entre a média do armazenamento medido e a média do armazenamento estimado pelo modelo, para as profundidades de 20, 60, 80 e 100cm (Tabela 2). Quanto a 40cm, nesta profundidade existiu uma mudança textural brusca, que pode ter sido a causa da fraca resposta do modelo. Os menores desvios relativos observados foram para as profundidades de 60, 80 e 100cm e os maiores foram para 20 e 40cm; a maior variabilidade da camada superficial está de acordo com a característica dessa camada, no que diz respeito à maior velocidade de carga e recarga. Os coeficientes de

correlação se mostraram significativos ao nível de $\alpha= 0,01$ para todas as profundidades (SPENCE et al., 1968), confirmando uma forte associação entre o armazenamento estimado e observado. Os coeficientes de assimetria tiveram valores próximos de zero, podendo-se assumir que os desvios observados entre os valores estimados e observados tem distribuição normal, embora a distribuição tenha um ramo assimétrico que se estende em direção aos valores mais negativos; os coeficientes de curtose para todas as profundidades tiveram valores em torno de $-1,0$ denotando uma distribuição relativamente plana, quanto à elevação do seu cume. Os valores de “t” calculados, à exceção de 40cm, não excedem o valor tabulado (2,58) para o nível de significância adotado ($\alpha = 0,01$), concluindo-se que o modelo calibrado com os parâmetros Etp, γ e k, pode ser utilizado para estimar a evaporação em um solo bruno não cálcico nas condições de clima semelhante ao da área onde foi desenvolvida a pesquisa.

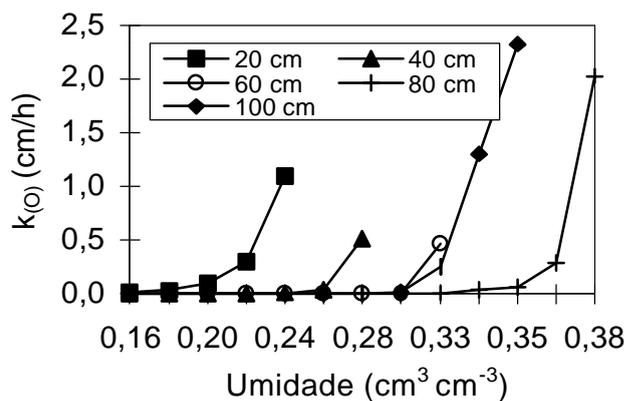


Figura 2. Condutividade hidráulica como profundidade de 100cm. Pentecoste-CE função da umidade do solo até a pro- 1995.

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	93,80	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; r: coeficiente de correlação; Aobs: Armazenamento observado; Cs: Coef. de assimetria; σ : Desvio padrão; Cr: Coef. de curtose; σ_r : Desvio relativo; "t" tabelado -

CONCLUSÕES

O estudo revela que é possível estimar a evaporação da água do solo, a partir do seu conteúdo de água, uma vez conhecidos os parâmetros físico-hídricos do solo e a evapotranspiração potencial do local.

Em solos Bruno não cálcicos semelhantes a este estudado, deve-se dar atenção especial ao monitoramento da água na camada superficial, visto que para profundidades além de 60cm, a variação da umidade em função do tempo ocorre a uma taxa muito pequena.

A camada superficial determina a evaporação, a qual só ocorre na condição potencial quando o solo encontrava-se próximo à saturação, dado o valor de k situar-se próximo da unidade, revelando uma maior importância das características físicas do solo em relação aos fatores meteorológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, J.V. **Parâmetros físico-hídricos de um solo sem cobertura vegetal e avaliação do “Modelo de Umidade do Solo para Atividades Agrícolas (MUSAG)**. Piracicaba : ESALQ – USP, 1997. 93 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo. 1997.
- AL-SHA’LAN, S.A., SALIH, A.M.A. Evapotranspiration estimates in extremely arid areas. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 113, n. 4, p. 565-574, 1987.
- ANDRADE, F.C. **Modelo de Umidade do Solo para Atividades Agrícolas (MUSAG)**. Fortaleza : FUNCEME, 1995. 36 p.
- BLACK, T.A., GARDNER, W.R., THURTELL, G.W. The prediction of evaporation, drainage in soils water storage for a bare soil. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v. 33, p. 655-660, 1969
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma : FAO, 1977. 143 p. (Paper n. 24)
- LEITHOLD, L. **O cálculo com geometria analítica**. 2. ed., São Paulo : Editora Harbra Ltda, 1986. 520 p.
- LIBARDI, P.L., REICHARDT, K., NIELSEN, D.R. et al. Simplified field methods for estimating the insaturated hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am.**, Madison, v. 44, p. 3-7, 1980.

LIBARDI, P.L., MANFRON, P.A., MORAES, S.O. et al. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 1-12, 1996.

SILVA, Z.R. . Climas do Estado do Ceará. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 23, n. 1/2, p 89-95, 1987.

SPENCE, J. T., COTTON, J.W., UNDERWOOD, B.J. et al. **Elementary Statistics**. New Jersey : Prentice-Hall, 1968. 282 p.