

MODELAGEM PARA PREVISÃO DO TEOR DE ÁGUA EM SOLO IRRIGADO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

Prof. Dra. Mariana Cecília Melo¹

André Mundstock Xavier de Carvalho²

Luís César Dias Drumond³

Lucas Martins Guimarães⁴

Resumo: Este trabalho teve como objetivo validar o software VADOSE/W para previsão do teor de água em solo cultivado com pastagem e irrigado por gotejamento subsuperficial. O algoritmo do software depende de parâmetros físico-hídricos do solo, dados climáticos da região, profundidade radicular da cultura e condições de contorno. O estudo foi realizado na área experimental da Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba. As estimativas do modelo foram comparadas aos valores de umidade determinados no solo na parcela referente a lâmina de 100% da evapotranspiração de referência (ET₀) pelo método gravimétrico, em três profundidades (0,00-0,10; 0,10-0,30 e 0,30-0,50 m) e a duas distâncias das fitas gotejadoras (0,25 e 0,50 m) com três repetições. A correlação de Pearson foi aplicada entre os resultados medidos e simulados para validação, podendo-se verificar que, nas condições avaliadas, a modelagem do VADOSE/W não foi satisfatória na previsão do teor de água. Possivelmente, a obtenção dos demais parâmetros e condições de contorno exigidos nos modelos numéricos sejam essenciais para que os resultados gerados pelo mesmo possam se assemelhar da melhor maneira possível com os dados de campo.

Palavras-chave: movimento de água no solo; umidade do solo; modelo numérico; VADOSE/W.

MODELING TO PREDICT WATER CONTENT IN SOIL IRRIGATED BY SUBSURFACE DRIP

Abstract: This work aimed to validate the VADOSE/W software for predicting water content in soil cultivated with pasture and irrigated by subsurface drip. The software algorithm depends on physical-water parameters of the soil, climatic data of the region, root depth of the crop and boundary conditions. The study was carried out in the experimental area of the Federal University of Viçosa – Campus Rio Paranaíba. The model estimates were compared to the moisture values determined in the soil in the plot referring to the 100% reference evapotranspiration depth (ET₀) by the gravimetric method, at three depths (0,00-0,10; 0,10-0,30 and 0,30-0,50 m) and at two distances from the drip tapes (0,25 and 0,50 m) with three repetitions. Pearson's correlation was applied between the measured and simulated results for validation, and it was possible to verify that, under the conditions evaluated, the VADOSE/W modeling was not satisfactory in predicting the water content. Possibly, obtaining the other parameters and boundary conditions required in the numerical models are essential so that the results generated by them can be as similar as possible to the field data.

Keywords: movement of soil water; unsaturated soil; numerical models; VADOSE/W.

¹ Professora do curso de Agronomia do Centro de Ensino Superior de São Gotardo – CESG, Rio Paranaíba, MG, Brasil, Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras, marianaceciliamel@yahoo.com.br.

² Professor associado da Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba, MG, Brasil, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa, andre.carvalho@ufv.br

³ Professor Adjunto da Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba, MG, Brasil, Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de São Paulo – UNESP, irriga@ufv.br

⁴ Professor Adjunto da Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba, Brasil, MG, Doutor em Geotecnia pela Universidade Federal de Viçosa, lucas.guimaraes@ufv.br

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Conciliar alta produtividade com racionalização do uso dos recursos hídricos é um dos grandes desafios do setor agrícola da atualidade. Conforme dados apresentados pela Agência Nacional das Águas - ANA (2015), nos últimos anos, o incremento da irrigação em todas as regiões hidrográficas do Brasil foi maior que o incremento da área total plantada, indicando uma maior adesão à essa técnica por parte dos produtores. Estimativas apontam que a demanda hídrica em 2050 será 55 % maior que a atual na utilização deste recurso (WWAP, 2015), o que mostra a necessidade de pesquisas que busquem otimizar os sistemas de irrigação bem como técnicas de manejo para evitar sua escassez e conflitos pelo seu uso.

Neste sentido, a irrigação localizada, apresenta-se como grande alternativa, simbolizando significativa evolução no processo da aplicação de água às culturas (MOSCA et al., 2005) e potencial de economia de água (AYARS et al., 2015).

Modelos numéricos podem ser uma alternativa precisa e importante para simular e reproduzir cenários atuais e futuros da interação solo-água-planta-atmosfera. Uma vantagem é que os resultados são obtidos rapidamente, já que o desenvolvimento computacional disponível atualmente tem facilitado consideravelmente seu uso (SIMUNEK & BRADFORD, 2009). Por outro lado, as modelagens podem apresentar algumas limitações, já que os resultados são dependentes dos parâmetros de entrada e de algumas condições de contorno que por vezes podem não ser situações reais que ocorrem em campo. Além disso, os parâmetros de entrada nem sempre são de fácil obtenção. Por isso, sempre que possível, deve-se efetuar a comparação entre dados medidos e simulados como forma de avaliação e validação (LIMA et al., 2001).

Os modelos processados em computador e calibrados em laboratório ou em campo são ferramentas econômicas capazes de avaliar e prever o desempenho da cobertura do solo, sobretudo, a longo prazo, quando os dados medidos podem não estar disponíveis. Essa abordagem experimental tem sido usada por alguns pesquisadores, como, Song & Yanful (2011); Demers et al. (2011); Possa et al. (2015); Pabst, et al. (2018); Argunhan-Atalay & Yazicigil (2018).

Embora vários programas de computador possam simular o fluxo de água em solos sob condições saturadas e não saturadas, alguns deles são mais comumente usados do que outros. Esses programas incluem modelos unidimensionais (1D), como Soilcover (WILSON et al., 1994), HYDRUS-1D (SIMUNEK et al., 2005) e modelos bidimensionais (2D), como HYDRUS-2D (SIMUNEK et al., 1999), SEEP / W (GEO-SLOPE, 2002), VADOSE / W (GEO-SLOPE, 2004). Os modelos 2D têm aplicações

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

mais extensas do que os modelos 1D, uma vez que simulam melhor os fenômenos que ocorrem na realidade (AUBERTIN & BUSSIÈRE, 2001).

O VADOSE/W é um software que foi elaborado para soluções de diversos problemas hidrológicos que realiza simulações em modelos 1D e 2D por meio de elementos finitos para análise de fluxo de água em meios porosos (regime transiente e permanente) e o balanço hídrico de um sistema para resolver a Equação de Richards (1931). Ele utiliza equações que estudam o fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera utilizando o método de Penman (1948) modificado por Wilson (1990), ou método de Penman-Wilson, o qual estima a evaporação real, a partir da pressão de vapor na superfície do solo acoplada com os processos de transferência de massa e calor (WILSON et al., 1993). Contudo, seu desempenho ainda precisa ser avaliado em condições específicas de campo, de laboratório e em casos específicos, como quando aplica-se uma fonte pontual de água no interior do solo.

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo a validação do software VADOSE/W na previsão do teor de água de um solo cultivado com pastagem e irrigado por gotejamento subsuperficial para as condições climáticas características da região do Alto Paranaíba – MG, comparando os resultados simulados com os obtidos em campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em área experimental de 1.000 m² do *Campus I* (CRP) da Universidade Federal de Viçosa em Rio Paranaíba, MG, nas coordenadas 19° 12' 34" S e 46° 07' 53" W, com altitude média de 1.100 m. O clima da região é classificado como Cwa, segundo Köppen, com estações de inverno e verão bem definidas, chuvas no verão e temperatura média do ar no mês mais quente maior que 22°C. O solo da região é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase cerrado, relevo plano (EMBRAPA, 2006).

Primeiramente o solo da área foi revolvido na profundidade 0,20 m por meio de duas aragens seguidas por duas gradagens. Posteriormente implantou-se o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial autocompensante, modelo Top Drip. Na área havia duas linhas de derivação para distribuição de água em quatro parcelas os quais conectavam-se as fitas gotejadoras. No início das linhas de derivação foram instalados cinco registros para controle das lâminas de água. As fitas gotejadoras foram espaçadas entre si a uma distância de 1,0 m, sendo enterradas a 0,20 m de profundidade. A distância entre gotejadores foi de 0,30 m, com vazão de

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

1,6 L h⁻¹, formando uma faixa molhada contínua. A pressão do sistema foi monitorada por meio de manômetro, o qual variou de 14 a 30 m.c.a.

No local foi semeado à lanço a *B. brizantha* cv. Marandu, na quantidade de 15 kg ha⁻¹, a qual foi irrigada em função de frações da evapotranspiração de referência (ET₀), correspondentes a (1, 50, 75, 100 e 125 % da ET₀), aplicadas na frequência de três vezes por semana na ausência de chuva, sendo a área total irrigada de 231 m² e cada unidade experimental correspondente a 15,12 m².

O volume de água aplicado nos sistemas de irrigação localizada geralmente é calculado por planta, porém a *B. brizantha* foi semeada à lanço. Por isso, o volume de água aplicado foi calculado como mm de água por unidade de área (m²).

O manejo da irrigação foi realizado mediante coleta diária da evapotranspiração de referência (ET₀) estimada pelo método de Penman-Monteith - FAO 56, coletados na estação meteorológica próxima à área irrigada.

Após o preparo do solo e instalação do sistema de irrigação, foram coletadas amostras de solo em cinco pontos aleatórios da área para caracterização dos atributos físicos e obtenção dos parâmetros necessários à modelagem.

A análise numérica foi realizada com modelos unidimensionais do movimento de água no solo, com auxílio do software comercial VADOSE/W do pacote GEOSTUDIO (2007), desenvolvidos pela GEO-SLOPE International Ltd. Este programa abrange equações de fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera, bem como condições iniciais e de contorno por meio de equações semelhantes à formulação simplificada proposta por Wilson (1990). Para a solução numérica, o programa VADOSE/W utilizou o método dos elementos finitos, fazendo a discretização espacial e o método das diferenças finitas implícito com integração no tempo. As equações básicas que governam o fluxo de água e transporte de calor são apresentadas nas Equações 1 e 2.

$$m \frac{\partial P}{\partial t} = Q + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial (\frac{P}{\rho_w g} + y)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial (\frac{P}{\rho_w g} + y)}{\partial y} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\lambda_t \frac{\partial T}{\partial t} = Q_t + L_v \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{ty} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho_w c_w V_x \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_w c_w V_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que P é a pressão da água, m é a inclinação da curva característica da água no solo, Q é o fluxo de contorno aplicado, P_v é a pressão de vapor da umidade do solo, D_v é o coeficiente de difusão de vapor, K_x e K_y são condutividade hidráulica nas direções x e y, respectivamente, y é a carga de elevação, ρ_w é densidade de água, g é aceleração devido à gravidade e t é tempo, k_t é capacidade de calor volumétrica

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

aparente do solo, T é temperatura, Q_t é o fluxo de limite térmico aplicado, L_v é o calor latente de vaporização; k_{tx} e k_{ty} são valores de condutividade térmica nas direções x e y , respectivamente, c_w é a massa específica de calor da água, V_x e V_y são a velocidade da água de Darcy nas direções x e y .

Em seguida, o fluxo de água (fases de líquido e vapor) e transferência de calor foram combinados usando Equação 3 (Edlefsen e Anderson, 1943).

$$P_v = P_{vs} \left(e^{\frac{-PW_v}{\rho_w RT}} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

em que P_{vs} é a pressão de vapor saturada de água pura livre, W_v é o peso molecular da água ($0,018 \text{ kg mol}^{-1}$), R é constante de gás universal ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

A evaporação real (E) é calculada usando o método de Penman-Wilson (Wilson, 1990) quando os dados de radiação de superfície líquida estão disponíveis, apresentados na Equação 4.

$$E = \frac{\Delta Q_n + v E_a}{\Delta + A v} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que, E é a evaporação real, D é a inclinação da curva de pressão de vapor de saturação versus temperatura na temperatura média do ar, Q_n é a energia radiante disponível na superfície, v é a constante psicométrica, $E_a = f(u) e_a (B - A)$, $f(u) = 0,35 (1 + 0,15 U)$, U é a velocidade do vento, e_a é a pressão de vapor no ar acima da superfície de evaporação, B é o inverso da umidade relativa do ar e A é o inverso da umidade relativa da superfície do solo.

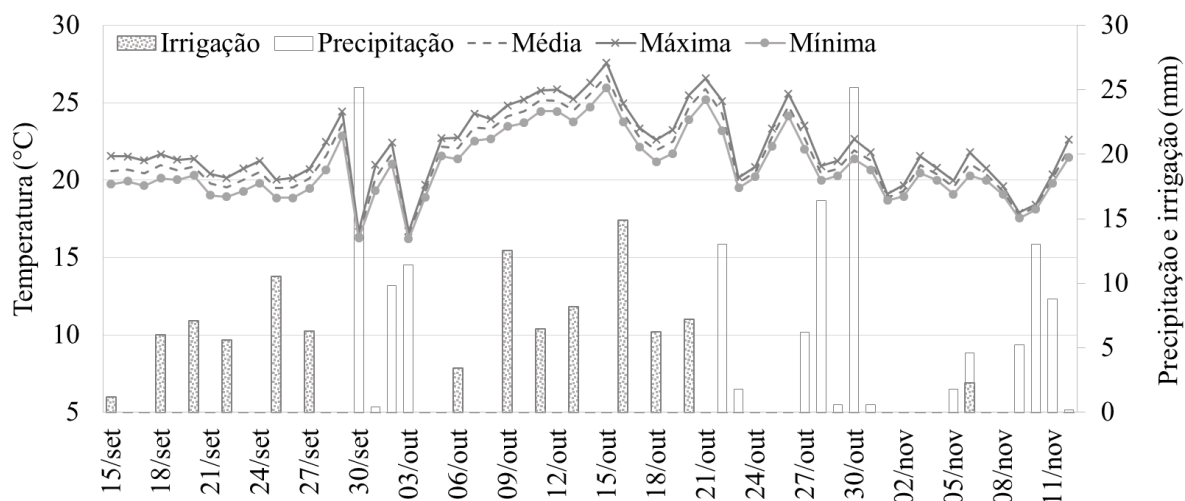
No VADOSE/W, as Equações de 1 a 4 são resolvidas simultaneamente usando elementos finitos e os dados de entrada para obter a taxa de evaporação real E , a pressão de vapor P_v , a pressão de água P e a temperatura T .

Os dados de entrada principais incluem a curva característica solo-água (CRA), a função de condutividade hidráulica, dados térmicos (condutividade térmica do solo, capacidade de massa específica de calor), dados climáticos (temperatura, umidade relativa, radiação solar, precipitação) e dados de vegetação (índice de área foliar e profundidade da zona radicular). Mais detalhes sobre o VADOSE/W são fornecidos em Krahn (2004).

Inicialmente foi admitido que a linha freática é tão profunda que a mesma não possui influência no presente estudo. Os parâmetros climáticos foram obtidos diariamente, por meio de uma estação meteorológica localizada a 50 m da área experimental, impostos como condições de contorno no topo da cobertura, sendo estes monitorados de 15/09/17 a 13/11/17. As Figuras 1, 2 e 3 são apresentadas os parâmetros climáticos utilizados no modelo.

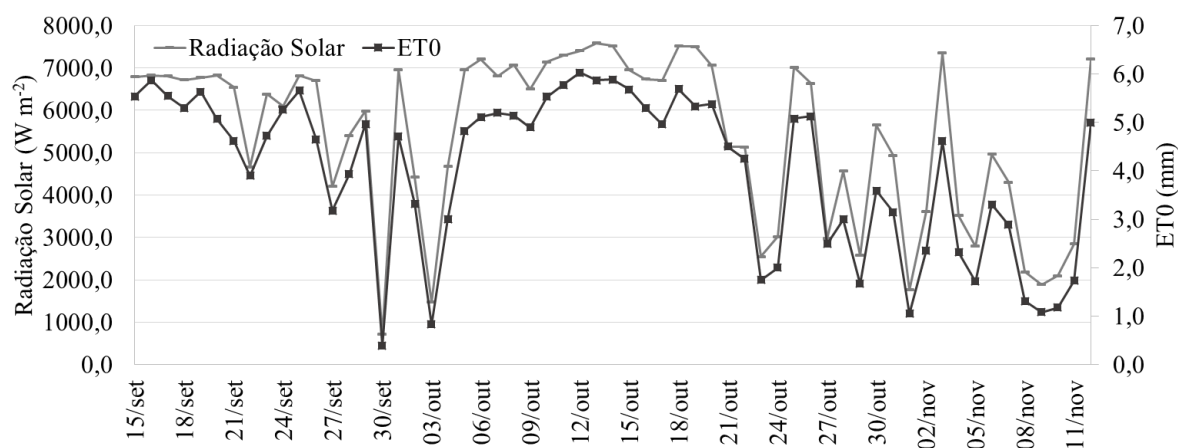
Figura 1. Precipitação, irrigação e temperaturas máxima, média e mínimas do período de avaliação.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br



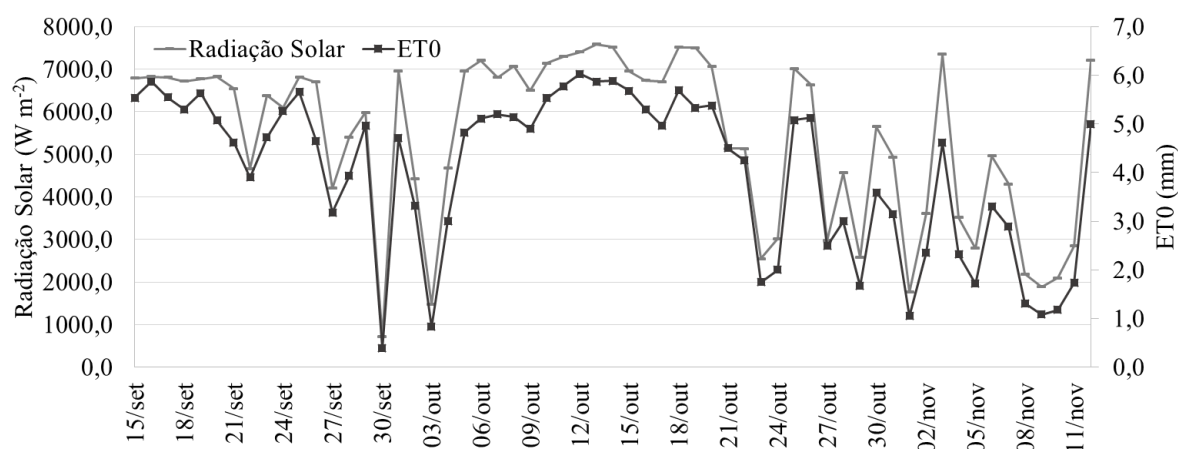
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2. Saldo de radiação solar e evapotranspiração de referência (ET₀).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3. Umidade relativa do ar média (UR) e velocidade do vento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os parâmetros que envolvem o solo foram determinados em campo e laboratório nos cinco pontos nas profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, sendo eles a granulometria, porosidade (e), peso específico dos sólidos (γ_s), curva de retenção de água no solo (CRA), condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) e função de condutividade hidráulica (FCH).

A granulometria conjunta e massa específica dos sólidos foram determinadas segundo as normas ABNT NBR-7181/84, ABNT NBR-6508/84, respectivamente, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Médias por pontos dos parâmetros peso específico dos sólidos (γ_s), granulometria e porosidade (e).

Pontos	γ_s (kN/m ³)	Granulometria (g kg ⁻¹)			e (%)
		Argila	Silte	Areia	
1	28,1	700	120	180	59,0
2	26,7	700	120	180	62,0
3	27,1	700	120	180	62,0
4	28,1	700	120	180	60,0
5	25,9	700	120	180	58,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), foi determinada em campo por meio do permeâmetro de Guelph, pelo método de uma e duas cargas. Os valores de K_{sat} médios, utilizados como parâmetros de entrada do modelo, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) obtida em campo nos cinco pontos nas profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

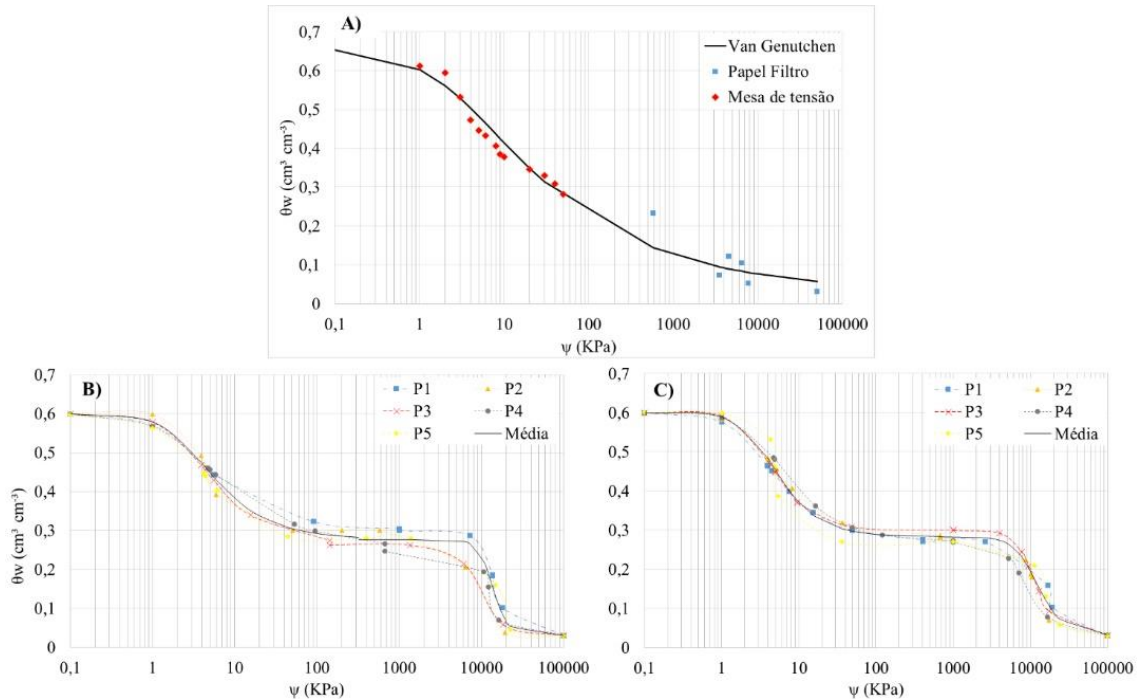
Profundidade	1 Carga - K_{sat}	2 Cargas - K_{sat}	Média K_{sat}
	----- cm s ⁻¹ -----		
0,00 – 0,20	$3,17 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-3}$	$2,50 \times 10^{-3}$
0,20 – 0,40	$3,08 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-3}$	$2,10 \times 10^{-3}$
0,40 – 0,60	$4,32 \times 10^{-3}$	$5,27 \times 10^{-3}$	$4,79 \times 10^{-3}$

Fonte: Elaborada pelo autor.

As curvas de retenção de água no solo (CRA's) de cada ponto e profundidade, apresentadas na Figura 4 e ajustadas ao modelo de van Genuchten-Mualem, foram determinadas pela técnica do papel filtro, ensaio padronizado pela ASTM D-5298 (Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper). Devido à frágil estrutura do solo na profundidade 0,0-0,20 m, optou-se por determinar

os pontos de sucção de 0-50 kPa por meio de mesa de tensão, sendo as demais sucções obtidas pela técnica do papel filtro.

Figura 4. Curvas de retenção de água no solo (CRA's) nas profundidades A) 0,00-0,20 m B) 0,20-0,40 m e C) 0,40-0,60 m.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos parâmetros necessários ao modelo de Van Genutchen (1980).

Tabela 3. Valores médios dos parâmetros de ajustes das curvas 1 e 2 por profundidade pelo modelo de van Genutchen, sendo, θ_{s1} a umidade volumétrica de saturação da curva 1, θ_{s2} a umidade volumétrica de saturação da curva 2, θ_{r1} a umidade volumétrica residual da curva 1, θ_{r2} a umidade volumétrica residual da curva 2, θ_i , m_i e n_i e os valores α , m e n obtidos pela curva de retenção.

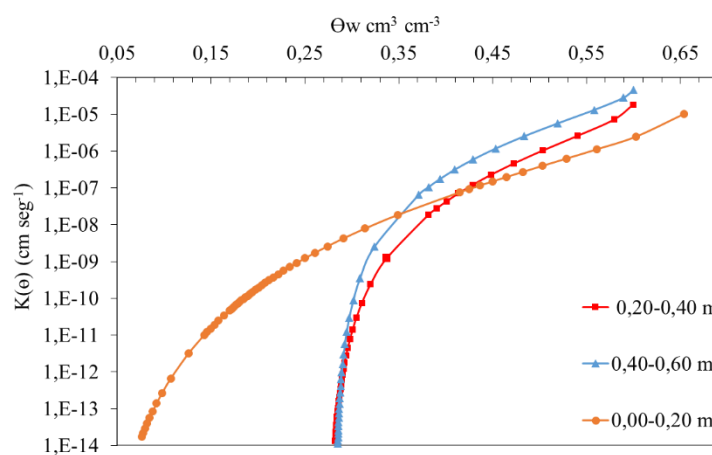
Parâmetros	Profundidades		
	0,0-0,20 m	0,2-0,4 m	0,4-0,6 m
$\theta_r 1$	0,03	0,27636	0,28297
$\theta_s 1$	0,66	0,60000	0,60000
$\alpha 1$	0,39	0,36543	0,28720
$n 1$	1,05	1,83481	2,15993
$m 1$	0,3	0,45498	0,53702
$\theta_r 2$	-	0,03000	0,03000
$\theta_s 2$	-	0,27636	0,28297

α 2	-	0,00008	0,00010
n 2	-	5,04664	3,03627
m 2	-	0,80185	0,67065

Fonte: Elaborada pelo autor.

A FCH, determinada indiretamente por meio dos dados de K_{sat} e parâmetros de ajuste das CRA's, estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5. Função de condutividade hidráulica (FCH) dado pela umidade volumétrica Θ_w ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e condutividade hidráulica $K(\Theta)$, nas profundidades 0,0-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O VADESE/W requer a especificação da relação entre a condutividade térmica e a umidade volumétrica do solo e ainda a relação entre o calor específico dos minerais dos solos e a umidade volumétrica. A função de condutividade térmica de um solo, baseada em Nixon (1975), pode ser definida como a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área de solo em uma unidade de tempo, sob uma unidade de gradiente. Neste trabalho, ela foi estimada constante e igual a $280 \text{ kJ (dia m } ^\circ\text{C}^{-1})$, como recomendado pelo manual do VADOSE/W. Já o calor específico volumétrico do solo, baseado em Vries (1963), pode ser definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do material em uma unidade de grau expressa em unidade de volume, sendo também estimado como uma constante e igual a $2750 \text{ kJ (m}^3 \text{ } ^\circ\text{C)}^{-1}$, como recomendado pelo manual do VADOSE/W.

A cobertura vegetal foi constituída pela pastagem B. brizantha cv. Marandu. O programa exige alguns parâmetros de entrada como, índice de área foliar (IAF), profundidade das raízes e as tensões referentes a capacidade de campo e o ponto de murcha do solo. O IAF foi estimado baseando-se nos resultados do trabalho de Sbrissia et al. (2008). A profundidade média das raízes para a B. brizantha cv. Marandu foi igual a 0,46 m, determinado por Cunha et al. (2010). A umidade

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoocultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

volumétrica referente a capacidade de campo do solo, sucção correspondente a 6 kPa, nas profundidades 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m foram iguais a 0,43, 0,42 e 0,40 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ respectivamente. Os valores de umidade volumétrica referentes ao ponto de murcha permanente (PMP), sucção na qual a planta é incapaz de retirar água do solo, estipulada em 1500 kPa, corresponderam a 0,12, 0,15 e 0,13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, valores estes retirados das CRA's nas respectivas profundidades.

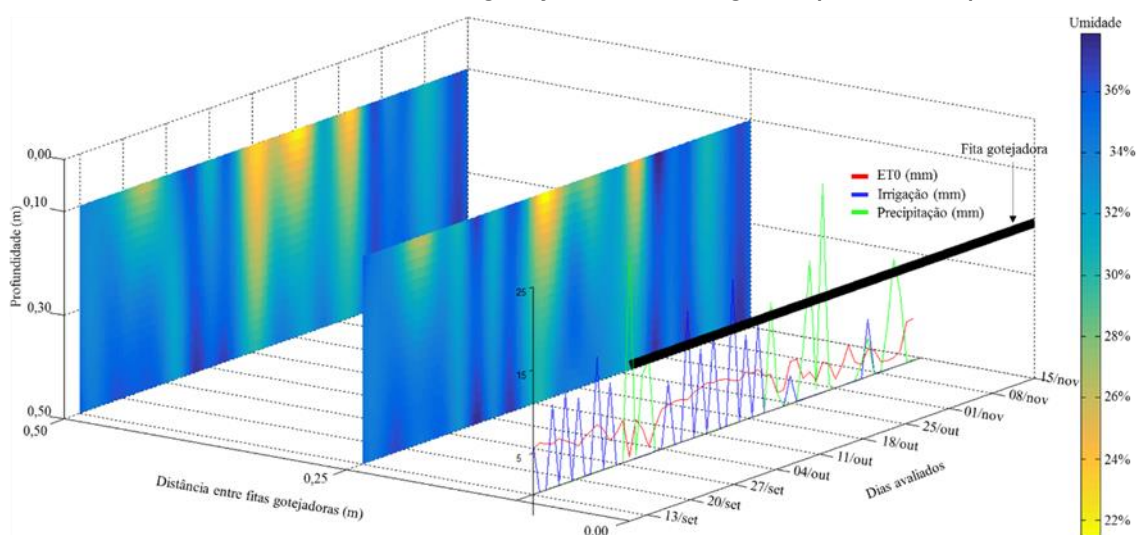
Para monitorar o teor de água no perfil foram coletadas aleatoriamente na parcela equivalente a lâmina de 100% da ET0 amostras de solo para determinação da umidade pelo método gravimétrico, sempre no mesmo horário antes da irrigação. Todas as coletas foram realizadas manualmente por meio de trado holandês em três profundidades (0,00-0,10, 0,10-0,30 e 0,30-0,50 m) em duas distâncias das fitas gotejadoras (0,25 e 0,50 m) e com três repetições, sendo o início e fim das coletas no dia 15/09/17 e 10/11/17, respectivamente.

Os resultados de umidade obtidos em campo e os simulados pelo VADOSE/W foram submetidos a correlação de Pearson aplicando-se, posteriormente o teste t ao nível de 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta os resultados da variação da umidade do solo em três profundidades, os quais foram coletadas aleatoriamente em duas distâncias da fita gotejadora ao longo do período experimental.

Figura 6. Evapotranspiração - ET0 (mm), precipitação (mm), irrigação (mm) e variação da umidade do solo (%) nas profundidades 0,10, 0,30 e 0,50 m coletados na distância de 0,25 e 0,50 m da fita gotejadora ao longo do período experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

Pode-se verificar na Figura 6 que as porções de solo seco estão mais concentradas na distância de 0,50 m da fita gotejadora em dias como maior ET₀ e, principalmente, quando a fonte hídrica era apenas a irrigação, indicando que o espaçamento entre as fitas gotejadoras tenha sido muito grande em solos com estas propriedades físico-hídricas. Sob essa perspectiva, observa-se por meio das Tabelas 1 e 2 que este solo, apesar de ser muito argiloso, possui como propriedades grande porosidade e permeabilidade, podendo-se inferir que a distância de 1,0 m entre fitas tenha sido grande o suficiente para impedir que a umidade fosse uniformemente distribuída pelo fluxo capilar nas camadas mais próximas à superfície e mais distantes da fita, o que pode ter gerado menor suprimento de água para as plantas mais distantes da mesma. Entretanto, não foram encontrados trabalhos na literatura quanto ao espaçamento de fitas gotejadoras para pastagem semeadas à lanço e cujo cálculo da lâmina tenha sido realizado como mm de água por m².

Ainda sobre a Figura 6 pode-se verificar uma maior variação da umidade na camada superficial (0,0-0,20 m) ao longo do período experimental, diferentemente das camadas de 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, sugerindo que a estrutura do solo na profundidade 0,0-0,20 m, alterada mediante seu preparo, deixou-o mais susceptível às perdas de água tanto por evaporação quanto por drenagem interna. Este fato pode ser constatado observando-se as CRA's nas diferentes profundidades (Figura 4A, 4B e 4C), uma vez que a camada superficial (0,0-0,20 m) teve comportamento muito distinto das camadas subsuperficiais (0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m) em determinadas sucções. Nas sucções de até 10 kPa verifica-se comportamento semelhante entre as três camadas, porém para sucções superiores a esta percebe-se uma redução mais drástica da umidade na camada superficial. Oliveira et al. (2004), Correia et al. (2008), Carducci et al. (2011), Souza et al. (2014), e Mezzomo et al. (2018) também avaliaram a retenção de água nos solos. Oliveira et al. (2004) obtiveram resultado semelhante ao deste trabalho ao determinarem CRA's em solos manejados por diferentes sistemas de preparo. Estes autores concluíram que na profundidade de 0,20-0,30 m o sistema de preparo com arado de discos foi o que mais alterou a estrutura do Latossolo Vermelho, com menor retenção de água no solo na faixa de tensão entre 0 e 6 kPa e maior retenção entre 6 e 100 kPa. Além disso, os autores concluíram que a semeadura direta apresentou maior disponibilidade de água do que o preparo com arado de discos na profundidade de 0,0-0,05 m do solo. Os sistemas de preparo convencionais, a fim de minimizar a densidade do solo e/ou aumentar a porosidade acabam pulverizando o mesmo, rompendo sua estrutura, o que consequentemente influencia na movimentação da água pelos processos de capilaridade. Rawls et al. (1991) aborda que a retenção de água no solo sob baixos potenciais matriciais é decorrente do processo de capilaridade, sendo, portanto, fortemente alterada pelo

arranjo das partículas do solo, devido à presença de poros estruturais (poros inter-agregados).

Na Tabela 4 são apresentadas as correlações de validação do modelo (correlação entre os dados medidos em campo e simulados).

Tabela 4. Correlação da validação entre os dados medidos em campo e simulados pelo software VADOSE/W

	Profundidades		
	0,0-0,10 m	0,10-0,30 m	0,30-0,50 m
R Pearson	0,326	0,439	0,299
p-valor	0,120	0,032	0,155
Desvio-padrão	±0,05	±0,03	±0,02
IC ($\alpha=1\%$)	±0,03	±0,02	±0,01
n	24		

Fonte: Elaborada pelo autor.

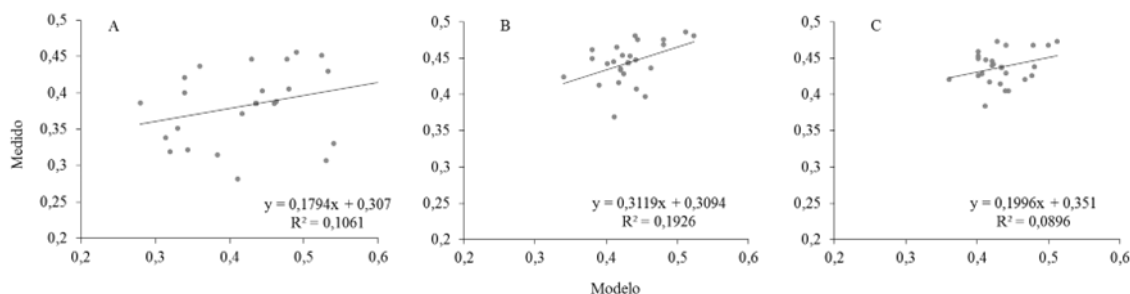
Pode-se verificar pela Tabela 4 que nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,30-0,50 m a correlação entre os resultados obtidos em campo e simulados é muito pequena ($R < 0,500$) e não são significativos pelo teste t ($p\text{-valor} > 0,05$). Já na profundidade 0,10-0,30 m até existe uma correlação significativa ($p\text{-valor} < 0,05$), porém verifica-se que é uma correlação muito fraca ($R\text{-Pearson} = 0,299$) a qual não nos dá segurança de que o método seja bom o suficiente para garantir sua aplicação como estimador de água disponível no solo nas condições avaliadas. Isto significa que não existem evidências de que os resultados sejam correlacionados, portanto a utilização do software VADOSE/W não foi suficientemente eficiente na previsão do teor de água disponível no solo nas condições avaliadas, ou seja, considerando-se uma fonte pontual de água no interior do solo.

Ainda que o software VADOSE/W simule processos hidrológicos como a infiltração e o movimento de água no perfil do solo sendo capaz de estimar o teor de água na profundidade desejada pôde-se verificar na literatura que sua aplicação é muito utilizada em estudos com foco diferente do deste trabalho. Na literatura seu emprego é voltado para trabalhos que avaliam sistemas de coberturas inibidoras de drenagem ácida (SONG & YANFUL, 2011; DEMERS et al., 2011; POSSA, et al., 2015; PABST et al., 2018), barreiras capilares (ARGUNHAN-ATALAY & YAZICIGIL, 2018), ou mesmo processos de infiltração de água em taludes (REDER et al., 2018), os quais, em todos os casos, as modelagens foram validadas com ótimos resultados. Sua aplicação na modelagem de percolação de água em sistemas agrícolas é incipiente, não sendo encontrados trabalhos semelhantes a este, a fim de comparar e discutir os resultados. Além disso, nos Latossolos tropicais, a estrutura granular fortemente desenvolvida pode modificar o padrão de influência da textura do solo sobre suas propriedades hídricas.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

Na Figura 7 são apresentados os gráficos da correlação dos resultados de umidade medidos e simulados no VADOSE/W.

Figura 7. Correlação entre os dados obtidos em campo (medido) e mensurados (modelo) pelo software VADOSE/W



Fonte: Elaborada pelo autor.

A diferença de umidade entre os dados determinados em campo e os gerados pelo modelo podem ser explicados por alguns fatores, como, por exemplo, os parâmetros de entrada e as condições de contorno impostas ao modelo. Alguns destes parâmetros, como IAF, profundidade e distribuição da zona radicular, função de condutividade térmica e o calor específico volumétrico do solo foram obtidos na literatura, os quais podem ter proporcionado estas divergências. O sucesso na aplicação de modelos depende, em larga escala, da habilidade em quantificar os parâmetros necessários para simular os diversos processos que ocorrem no sistema solo-água-planta-atmosfera. Oliveira & Augusto Filho (2006) salientam a importância dos parâmetros de entrada para oferecer uma base consistente dos resultados modelados, para que dessa forma apresentem uma boa aproximação da realidade.

Além disso, o momento da coleta das amostras de solo também pode ser uma explicação razoável para a divergência de resultados de alguns dias da avaliação experimental. A coleta de solo foi sempre realizada no mesmo horário na parte da manhã antes das irrigações, porém o modelo estima as umidades diárias e não o momento exato da coleta. Portanto, o teor de água do solo do modelo já leva em consideração a irrigação e a precipitação que eventualmente ocorreram posteriormente à coleta de solo.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo o software VADOSE/W não foi satisfatório em prever o teor de água de um solo vegetado por B. brizantha cv. Marandu e irrigado por gotejamento subsuperficial.

A obtenção dos parâmetros de entrada para modelos numéricos é essencial para que os resultados estimados possam se aproximar melhor dos dados de campo.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. Encarte Especial sobre a Crise Hídrica: Informe 2015. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, 2015.

ARGUNHAN-ATALAY, C. & YAZICIGIL, H. Modeling and Performance Assessment of Alternative Cover Systems on a Waste Rock Storage Area. **Mine Water Environ**, v. 37, p. 106-118, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0476-y>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508/84. Solo – **Determinação da massa específica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1984

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/84. Solo – **Análise Granulométrica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1984.

ASTM D-5298-03. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter Paper**, 2003.

AUBERTIN M.; BUSSIÈRE, B. Discussion of Water flow through cover soils using modeling and experimental methods. **Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering**, v. 127, p. 810–811, 2001.

AYARS, J.E.; FULTON, A; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay? **Agricultural Water Management**, v.157, p.39-47, 2015.

CARDUCCI, C. E.; OLIVERIA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.77-86, 2011.

CORREIA, G. G.; MOURA, R. F.; RODRIGUES, J. J. V.; BARROS, M. F. C.; CORREIA, K. G. Caracterização da capacidade de retenção e disponibilidade de água em solos de tabuleiro costeiro paraibanos. **Revista Caatinga**, v. 21, p. 156-162, 2008.

CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; ALENCAR, C. A. B.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; OLIVEIRA, R. A. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 351-357, 2010. DOI: 10.4025/actasciagron.v32i2.1020.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

DEMERS, I.; BUSSIÈRE, B.; AACHIB, M.; AUBERTIN, M. Repeatability Evaluation of Instrumented Column Tests in Cover Efficiency Evaluation for the Prevention of Acid Mine Drainage. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 219, p. 113-128, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0692-6>

EDLEFSEN, N. E.; ANDERSON, A. B. C. Thermodynamics of soil moisture. **Hilgardia**, v. 15, p. 21–298, 1943.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. v. 2, Rio de Janeiro, 2006.

GEO-SLOPE. SEEP/W for finite element seepage analysis, user's guide. **GEO-SLOPE International Limited**, Calgary, Alberta, Canada, 2002.

GEO-SLOPE. VADOSE/W User's guide. **GEO-SLOPE International Limited**, Calgary, Alberta, Canada, 2004.

GEOSTUDIO. GEO-SLOPE International Ltd. Vadose Zone Modeling with VADOSE/W. **User's Guide**. Calgary, Alberta, Canada, 2007.

KRAHN, J. Vadose zone modeling with VADOSE/W: An engineering methodology. **GEO-SLOPE International Ltd**, Calgary, Alberta, Canada, 2004.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 33-41, 2001. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662001000100007>

MEZZOMO, W.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; KIRCHNER, J. H.; TORRES, R. R.; BEM, L. H. B. Comparação dos modelos de Campbell e de van Genuchten para a determinação da curva de retenção de água em diferentes solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, p. 2395-2405, 2018. DOI: 10.7127/rbai.v12n100739

MOSCA, M. A.; TESTEZLAF, R.; GOMES, E. P. Desenvolvimento de emissores alternativos para irrigação subsuperficial de baixa pressão. **Irriga, Botucatu**, v. 10, n. 3, p. 249-262, 2005.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

NIXON, J. F. The role of convective heat transport in the thawing of frozen soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 12, p. 425-429, 1975.

OLIVEIRA, A. S.; AUGUSTO FILHO, O. Análise e aplicação de modelos numéricos de simulação do fluxo da água subterrânea e dispersão de contaminantes em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG). **Minerva**, v. 5, n. 3, p. 267-276, 2006.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 327-336, 2004

PABST, T.; BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; MOLSON, J. Comparative performance of cover systems to prevent acid mine drainage from pre-oxidized tailings: A numerical hydro-geochemical assessment. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 214, p. 39-53, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.05.006>

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society of London**, London, v.193, p.120-45, 1948.

POSSA, M. V., SOARES, A. B.; SOUZA, V. P.; SOARES, P. S. M. Balanço hídrico em coberturas secas utilizando modelagem numérica. **Série Tecnologia Ambiental**, v. 80, Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015. 43p.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J. & BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, v. 16, p. 213-234, 1991.

REDER, A.; RIANNA, G.; PAGANO, L. Physically based approaches incorporating evaporation for early warning predictions of rainfall-induced landslides. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, p. 613-631, 2018. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-613-2018>

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids though porous médium. **Physics, New York**, v. 1, p. 318-333, 1931.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. C. Comparação de três métodos para estimativa do índice de área foliar em pastos de capim-marandu sob lotação contínua. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 212-220, 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982008000200006>.

SIMUNEK J.; SEJNA M.; VAN GENUCHTEN, M. T. H. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0. U.S. **Salinity Laboratory**, USDA, ARS, Riverside, 1999.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAITO, M. H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. The HYDRUS-1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated Media. Version 4.08. Riverside, USA: **University of California, Department of Environmental Sciences**, 332p., 2009.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T. H.; SEJNA, M. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 3.0, HYDRUS software series 1. **Department of Environmental Sciences, University of California Riverside**, Riverside, 2005.

SONG, Q; YANFUL, E. K. Laboratory and numerical modeling of water balance in a layered sloped soil cover with channel flow pathway over mine waste rock. **Environmental Earth Sciences**, v. 62, p. 1-17, 2011. Doi: 10.1007/s12665-010-0488-4

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Curva de retenção de água e condutividade hidráulica do solo em lavoura de café Conilon submetida à subsolagem. *Coffee Science*, Lavras, v. 9, p. 226-236, 2014.

VRIES, D. A. Thermal properties of soils. In: **The Physics of Plant Environment**, W. R. Van Wijk (ed.), North Holland Pub. Co., p. 382, 1963.

WILSON G. W.; FREDLUND, D. G.; BARBOUR, S. L. Coupled soil atmosphere modeling for soil evaporation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 151-161, 1994

WILSON, G.W. Soil Evaporation fluxes for geotechnical engineering problems. PhD. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canadá, 1990.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br

WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. Coupled soil–atmosphere modeling for soil evaporation. **Canadian Geotechnical Journal** v. 31, p. 151–161, 1993.

WWAP - United Nations World Water Assessment Programme). **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Paris, UNESCO, 2015.

Revista Brasileira de Educação e Cultura – ISSN 2237-3098 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	2022 - Vol. 13 - Número 1
http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/educacaoecultura	rev.edu.cult@cesg.edu.br