

## MODELOS PARA ESTIMATIVA DIÁRIA DA PROFUNDIDADE EFETIVA DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR, FEIJOEIRO E MILHO

**BRUNO CÉSAR GURSKI<sup>1</sup>; JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA<sup>2</sup>; ADÃO WAGNER PÊGO EVANGELISTA<sup>3</sup>; DANIELA JERSZURKI<sup>4</sup> E ROBSON ANDRÉ ARMINDO<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Rua dos Funcionários, 1540, Cabral, 80035-050, Curitiba-PR, Brasil, brunogurski@ufpr.br

<sup>2</sup>Doutor em Irrigação e Drenagem, ESALQ/USP, Professor Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR, jmoretti@ufpr.br, rarmindo@ufpr.br

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UFG, awpego@pq.cnpq.br

<sup>4</sup> Post Doctor, Jacob Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Israel, 84990, danijerszurki@gmail.com

### 1 RESUMO

As avaliações da profundidade efetiva do sistema radicular ( $z$ ) ao longo do tempo são fundamentais, pois representam o volume de controle da água no sistema solo-planta. Consequentemente, estimativas corretas influenciam diretamente no desenvolvimento de práticas racionais de manejo e uso da água em sistemas agrícolas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar modelos de melhor desempenho para estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular ( $z$ ) da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho. Os modelos utilizados basearam-se em dias após plantio (*DAP*), dias julianos (*J*) e graus-dia acumulado (*GDA*). A comparação entre os valores reais e estimados foi realizada empregando coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ), índice “*d*” de correspondência, índice “*c*” de desempenho, erro médio e erro absoluto médio. O melhor modelo para a estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho, nos diferentes tipos climáticos estudados, foi o modelo que utiliza os valores de coeficiente de cultivo diário. O modelo que utiliza dias após plantio proposto por Borcioni foi insatisfatório para o monitoramento diário de todas as culturas e tipos climáticos estudados. Os modelos que utilizam dias após plantio, dias julianos e graus-dia acumulado foram satisfatórios em parte, de acordo com a cultura e tipo climático em questão.

**Palavras-chave:** Crescimento radicular, dias após plantio, graus-dia acumulado

**GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; ARMINDO, R. A.; EVANGELISTA, A. W. P.  
DAILY ESTIMATION MODELS TO ROOT SYSTEM EFFECTIVE DEPTH  
MONITORING OF SUGARCANE, BEAN AND CORN**

### 2 ABSTRACT

Assessment of effective root system depth ( $z$ ) over time is essential, because it represents water volume control in the soil-plant system. Consequently, correct estimates directly influence the

development of rational management practices and water use in agricultural systems. The study aimed to evaluate and to identify models of best performance to estimate  $z$  to improve the determination of soil water storage to crops. The models used were based on days after planting (*DAP*), Julian days (*J*) and accumulated degree days (*GDA*). The comparison between actual and estimated values was performed using coefficient of determination adjusted ( $R^2$ ), performance index " $d$ ", agreement index " $c$ ", mean error and mean absolute error. The best model for the daily estimate of effective root system depth of sugarcane, bean and corn in the different climatic types studied, was the model that uses the daily crop coefficient values. The model that utilizes days after planting proposed by Borcioni (2008) was insufficient for the daily estimate of all cultures and climatic types studied. Models that use days after planting, julian days and accumulated degree-days were satisfactory in part, according to the culture and climate type.

**Keywords:** Root growth, days after planting, accumulated degree days.

### 3 INTRODUÇÃO

O setor que mais consome água é a agricultura, principalmente por meio da irrigação. No entanto, a produção de alimentos é necessária, por isso é preciso obter alternativas que maximizem a eficiência do uso da água. O desafio atual consiste em produzir mais alimento utilizando menos água (DRECHSEL et al., 2015).

Neste contexto, o conhecimento da dinâmica do crescimento radicular das plantas é essencial para compreender melhor o consumo hídrico das culturas agrícolas. Os métodos para medir o sistema radicular podem ser diretos ou indiretos, sendo que os primeiros são onerosos e trabalhosos, levando a erros de interpretação a respeito da utilização dos recursos do solo, pois dificilmente contabilizam as raízes mais finas, responsáveis por fração considerável da absorção de água (OLIVEIRA; GARCIA; DOURADO NETO, 2000; HERMES; MEDEIROS; MANFRON, 2003).

Solução mais rápida, eficaz e de menor custo consiste em realizar estimativas por métodos indiretos. No entanto, atualmente os modelos ainda são muito escassos, devido aos vários fatores fisiológicos, climáticos e pedológicos que influenciam o crescimento das raízes (ZHANG et al., 2009). Além disso, sabe-se que o comprimento total do sistema radicular não indica a real capacidade de extração de água das plantas (HERMES; MEDEIROS; MANFRON, 2003). Portanto, é mais indicado utilizar a profundidade efetiva do sistema radicular ( $z$ ), que corresponde a 95% do sistema radicular ativo, em termos de profundidade e volume explorado do solo (REICHARDT; TIMM, 2012).

Admite-se na literatura que o crescimento da  $z$  assume comportamento linear, potencial ou sigmoidal e o ajuste dos modelos de estimativa se dá utilizando a dimensão fractal ou parâmetros estatísticos (DOURADO NETO; PARLANGE; NIELSEN, 1995). Consequentemente, torna-se extremamente difícil estabelecer qual o melhor modelo para o monitoramento da  $z$  de acordo com a cultura agrícola e as condições climáticas da região de interesse.

Devido às dificuldades citadas, comumente generaliza-se o crescimento da  $z$  ao longo do ciclo das culturas agrícolas. Essa supressão de informação ocasiona prejuízos aos estudos que envolvem o consumo hídrico das plantas. Por isso, o monitoramento diário da  $z$  é fundamental para o cálculo do balanço hídrico agrícola, porque representa o volume de controle diário da água no sistema solo-planta, ou seja, demonstra qual a capacidade de água disponível

para a planta diariamente. Consequentemente, estimativas mais precisas influenciam diretamente no desenvolvimento de práticas racionais de manejo e uso da água em sistemas agrícolas.

O trabalho teve como objetivo avaliar modelos de melhor desempenho para estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

Os valores aferidos da profundidade efetiva do sistema radicular ( $z_m$ ) da cana-de-açúcar (*Saccharum sp. L.*), feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) e milho (*Zea mays*) foram obtidos em trabalhos científicos que estudaram especificamente a variação temporal da  $z_m$  considerando diferentes métodos para o estabelecimento dos estádios de desenvolvimento de cada cultura (Tabela 1). Todos os dados foram levantados em Latossolo, tendo como principal variação as diferentes condições climáticas dos locais.

**Tabela 1.** Áreas experimentais e metodologias para determinar os valores medidos de profundidade do sistema radicular ( $z_m$ )

Autoria	Cultura	Cultivar	Plantio	Local	Tipo Climático <sup>1</sup>	Medida $z_m$
Ido et al. (2006)	Cana	RB855536	06/04/1999	Paranavaí-PR	B <sub>2r</sub> B'3a'	Rizotron
Parizi (2010)	Feijoeiro	IPR88	01/12/2008	Santa Maria-RS	B <sub>4r</sub> B'3a'	Amostragem
Parizi (2010)	Milho	Pioneer 32R22	01/12/2008	Santa Maria-RS	B <sub>4r</sub> B'3a'	Amostragem
Hermes et al. (2003)	Milho	C901, C333B e C806	20/10/1997	Piracicaba-SP	B <sub>1r</sub> B'4a'	Amostragem

<sup>1</sup> Obtido com a classificação de Thornthwaite (1948).

Os modelos utilizados no presente trabalho foram baseados no tempo ( $DAP$  – dia após plantio e  $J$  – dias julianos) ou nos graus-dia acumulado ( $GDA$ ). Os modelos que utilizam  $DAP$  ou  $J$  têm aplicação mais local, onde os dados foram obtidos, enquanto os que consideram os  $GDA$  são universais, podendo ser utilizados em qualquer local ou região. Os modelos foram os seguintes:

– Modelo polinomial proposto por Borcioni (2008): consiste em uma função obtida por regressão polinomial que descreve a  $z$  baseando-se nos  $DAP$  da cultura.

$$z(DAP)_B = 17,5 - 1,68 \cdot DAP + 0,29 \cdot DAP^2 - 0,006 \cdot DAP^3 \quad (1)$$

Em que:

$z(DAP)_B$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos dias após plantio (m);  
 $DAP$  – dias após plantio (dias).

– Modelo senoidal proposto por Borg e Grimes (1986) baseando-se no  $DAP$ .

$$z(DAP)_{BG} = z_{m\acute{a}x} \cdot \left( 0,5 + 0,5 \cdot \text{sen} \left( 3,03 \cdot \frac{DAP_i}{DAP_T} - 1,47 \right) \right) \quad (2)$$

Em que:

$z(DAP)_{BG}$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos dias após plantio (m);  
 $z_{máx}$  – profundidade efetiva máxima do sistema radicular recomendada por Allen et al. (1998) (m);

$DAP_i$  –  $i$ -ésimo dia após o plantio (dia);

$DAP_T$  – total de dias após plantio para completar o ciclo da cultura (dia).

– Modelo proposto por Schouwenaars (1988) baseado no  $DAP$ .

$$z(DAP)_S = z_{máx} \cdot \left( \frac{DAP_i}{DAP_T} \right)^{0,5} \quad (3)$$

Em que:

$z(DAP)_S$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função de dias após plantio (m);  
 $z_{máx}$  – profundidade efetiva máxima do sistema radicular recomendada por Allen et al. (1998) (m);

$DAP_i$  –  $i$ -ésimo dia após o plantio (dia);

$DAP_T$  – total de dias após o plantio para completar o ciclo da cultura (dia).

– Modelo exponencial proposto por Borcioni (2008): consiste em uma função obtida por regressão exponencial entre valores da  $z$  e  $GDA$ .

$$z(GDA)_B = \frac{51,5}{\left( 1 + e^{\left( \frac{-(GDA-186,9)}{53,4} \right)} \right)} \quad (4)$$

Em que:

$z(GDA)_B$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos graus-dia acumulado (m);  
 $GDA$  – graus-dia acumulado (°C).

– Modelo sigmoideal proposto por Dourado Neto e Van Lier (1991).

$$z(GDA)_{DV} = z_o + \left( \frac{z_{máx} - z_o}{2} \right) \cdot \left[ 1 - \cos \left( \pi^{\frac{1}{f}} \frac{GDA_i}{0,7 \cdot GDA_T} \right)^f \right] \quad \text{para } GDA_i < 0,7 GDA_T \quad (5)$$

$$z(GDA)_{DV} = z_{máx} \quad \text{para } GDA_i \geq 0,7 GDA_T \quad (6)$$

Em que:

$z(GDA)_{DV}$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função dos graus-dia acumulado (m);

$z_o$  – profundidade inicial do sistema radicular (m);

$z_{máx}$  – profundidade máxima do sistema radicular (m);

$f$  – fator de forma, determinado por meio de análise de regressão (adimensional);

$GDA_i$  – graus-dia acumulado até o  $i$ -ésimo dia (°C);

$GDA_T$  – graus-dia acumulado total necessários para completar o ciclo da cultura (°C).

– Modelo proposto por Campbell e Diaz (1988): baseia-se no tempo juliano, que é a contagem seguida dos dias a partir de primeiro de janeiro.

$$z(J)_{CD} = z_{min} + (z_{max} - z_{min}) \cdot \left( \frac{1}{1 + 44,2 \cdot e^{(-8,5(J_i - J_o) + (J_f - J_o))}} \right) \quad (7)$$

Em que:

$z(J)_{CD}$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função do dia juliano (m);

$z_{min}$  – profundidade efetiva inicial do sistema radicular proposta por Allen et al. (1998) (m);

$z_{max}$  – profundidade efetiva máxima do sistema radicular proposta por Allen et al. (1998) (m);

$J_i$  –  $i$ -ésimo dia juliano (dia);

$J_o$  – dia juliano de emergência da cultura (dia);  $J_f$  – dia juliano de maturação da cultura (dia).

– Modelos propostos por Allen et al. (1998): são dois modelos condicionais que estabelecem funções para o crescimento inicial da  $z$  até chegar ao valor máximo, que é mantido até o final do ciclo da cultura:

- Modelo linear baseado nos dias julianos

$$z(J)_A = z_{min} + (z_{max} - z_{min}) \cdot \left( \frac{J_i - J_{ini}}{J_{max} - J_{ini}} \right) \quad \text{para } J_{ini} \leq J_i \leq J_{max} \quad (8)$$

$$z(J)_A = z_{min} \quad \text{para } J_i < J_{ini} \quad (9)$$

$$z(J)_A = z_{max} \quad \text{para } J_i > J_{max} \quad (10)$$

Em que:

$z(J)_A$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função do dia juliano (m);

$J_i$  –  $i$ -ésimo dia juliano em que a cultura se encontra (dia);

$J_{ini}$  – dia juliano inicial de estabelecimento da cultura (dia);

$J_{max}$  – dia juliano quando  $z$  alcança  $z_{max}$  no ciclo da cultura (dia).

- Modelo linear baseado no coeficiente de cultivo ( $kc$ ) diário

$$z(kc)_A = z_{min} + (z_{max} - z_{min}) \cdot \left( \frac{kc_i - kc_{ini}}{kc_{med} - kc_{ini}} \right) \quad \text{para } J_i < J_{med} \quad (11)$$

$$z(kc)_A = z_{max} \quad \text{para } J_i \geq J_{med} \quad (12)$$

Em que:

$z(kc)_A$  – profundidade efetiva do sistema radicular em função do coeficiente de cultivo (m);

$z_{min}$  – profundidade efetiva inicial do sistema radicular recomendada por Allen et al. (1998) (m);

$z_{max}$  – profundidade efetiva máxima do sistema radicular recomendada por Allen et al. (1998) (m);

$kc_i$  – valor do coeficiente de cultivo no  $i$ -ésimo dia (adimensional);  
 $kc_{ini}$  – valor do coeficiente de cultivo no estágio de desenvolvimento inicial (adimensional);  
 $kc_{méd}$  – valor médio do coeficiente de cultivo ao longo do ciclo da cultura (adimensional);  
 $J_i$  –  $i$ -ésimo dia juliano em que a cultura se encontra (dia);  
 $J_{méd}$  – dia médio de duração do ciclo da cultura (dia).

O valor diário de  $kc$  foi determinado com a seguinte equação (ALLEN et al., 1998):

$$kc = kc_A + [0,04 \cdot (u_2 - 2) - 0,004 \cdot (UR_{\min} - 45)] \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (13)$$

Em que:

$kc$  – coeficiente de cultivo (adimensional);  
 $kc_A$  – coeficiente de cultivo recomendado por Allen et al. (1998) (adimensional);  
 $u_2$  – velocidade média do vento a 2 m de altura no respectivo período (médio ou final) ( $m s^{-1}$ );  
 $UR_{\min}$  – umidade relativa mínima média diária (%);  $h$  – altura média da planta (m).

Os valores médios de  $kc$  foram de 0,74; 0,98; 0,86 para a cana-de-açúcar, feijoeiro e milho, respectivamente (GURSKI et al., 2016). Importante frisar que tratam-se de valores médios, os ciclos das culturas são diferentes, a equação considera fatores climáticos para a estimativa.

Os graus-dia acumulado ( $GDA$ ) foram calculados com a seguinte equação (VILLA NOVA et al., 1972):

$$GDA = \frac{(T_{\max i} - T_{bi})^2}{2(T_{\max i} - T_{\min i})} \quad (14)$$

Em que:

$GDA$  – graus-dia acumulado ( $^{\circ}C$ );  
 $T_i$  – temperatura média do  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ );  $T_{bi}$  – temperatura base inferior da cultura ( $^{\circ}C$ );  
 $T_{\max i}$  – temperatura máxima do  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ );  
 $T_{\min i}$  – temperatura mínima do  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ ).

Os dias julianos ( $J$ ) foram calculados considerando a contagem seguida dos dias a partir de primeiro de janeiro até o dia final do respectivo estágio de desenvolvimento da cultura.

A comparação entre os diferentes modelos foi realizada empregando coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ), índice “ $d$ ” de Willmott et al. (1985), índice “ $c$ ” de Camargo e Sentelhas (1997), erro médio (EM) e erro absoluto médio (EAM).

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left( \left| E_i - \bar{O}_i \right| + \left| O_i - \bar{O}_i \right| \right)^2} \right] \quad (15)$$

Em que:

$d$  – índice de concordância de Willmott *et al.* (1985) (adimensional);

$E_i$  – valor estimado no  $i$ -ésimo dia (m);

$O_i$  – valor observado no  $i$ -ésimo dia (m);

$\bar{O}_i$  – média da variável observada no período considerado (m).

$$c = |R \cdot d| \quad (16)$$

Em que:

$c$  – índice “ $c$ ” de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997) (adimensional) ( $c > 0,85$  – Ótimo;  $0,85 \leq c < 0,75$  – Muito Bom;  $0,75 \leq c < 0,65$  – Bom;  $0,65 \leq c < 0,60$  – Mediano;  $0,60 \leq c < 0,50$  – Sofrível;  $0,50 \leq c < 0,40$  – Mau;  $c \leq 0,40$  – Péssimo);

$R$  – coeficiente de correlação (adimensional).

$$EM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (17)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (|E_i - O_i|) \quad (18)$$

Em que:

$EM$  – erro médio (m);

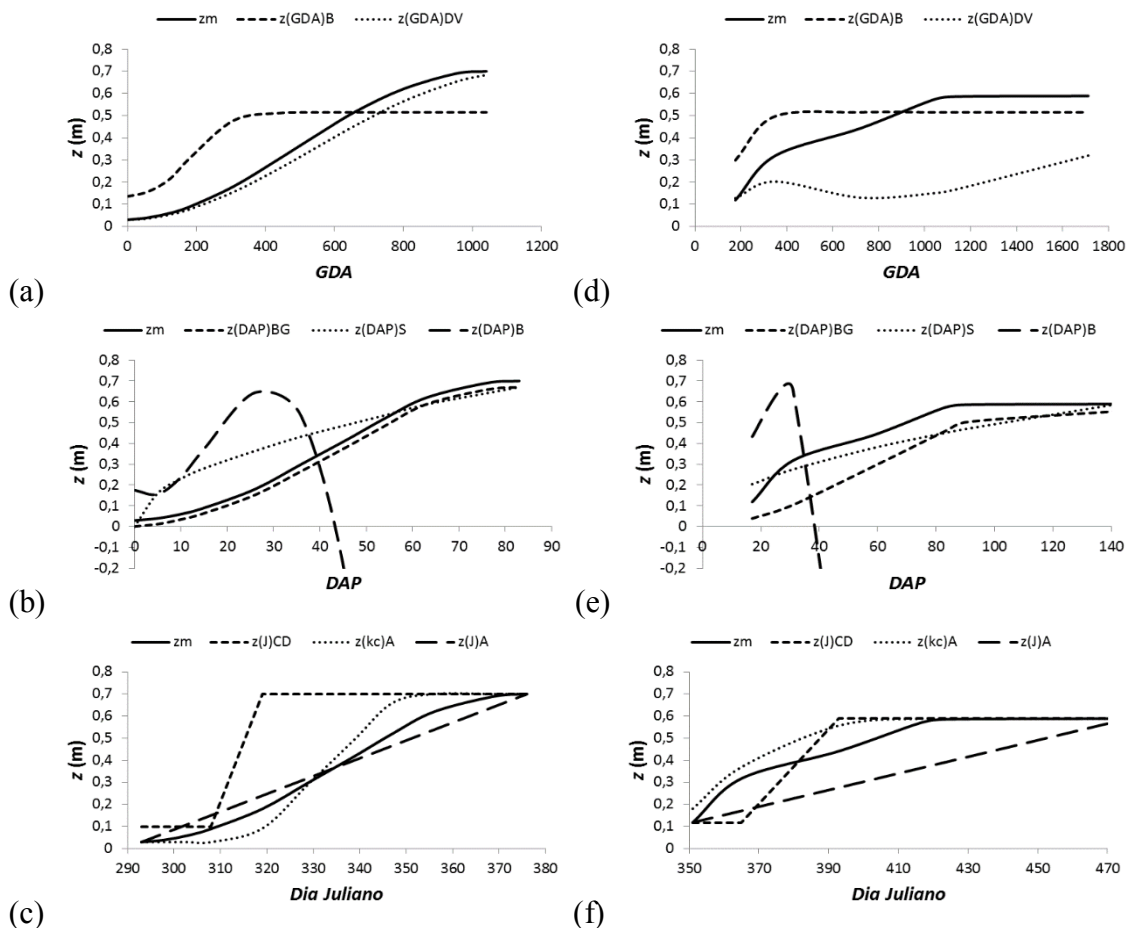
$EAM$  – erro absoluto médio (m);

$n$  – número de observações.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo  $z(DAP)_B$  foi insatisfatório para estimar a  $z$  nas culturas estudadas, porque a tendência de crescimento radicular seguiu um polinômio de terceiro grau, apresentando valores negativos no final do ciclo de todas as culturas, o que não explica o comportamento real de crescimento das raízes (Figuras 1b, 1e e 2b). Borg e Grimes (1986), Dourado Neto, Parlange e Nielsen (1995) e Zhang et al. (2009) estabeleceram que há estabilização no crescimento da  $z$  quando da maturação fisiológica da cultura.

**Figura 1.** Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura do milho, medidos ( $z_m$ ) e estimados com os modelos propostos, referentes a graus-dia acumulado ( $GDA$ ), dias após plantio ( $DAP$ ) e dias julianos ( $J$ ), sendo: (a), (b) e (c) dados de  $z_m$  referentes à Piracicaba-SP (HERMES; MEDEIROS; MANFRON, 2003) e; (d), (e) e (f) dados de  $z_m$  referentes à Santa Maria-RS (PARIZI, 2010).

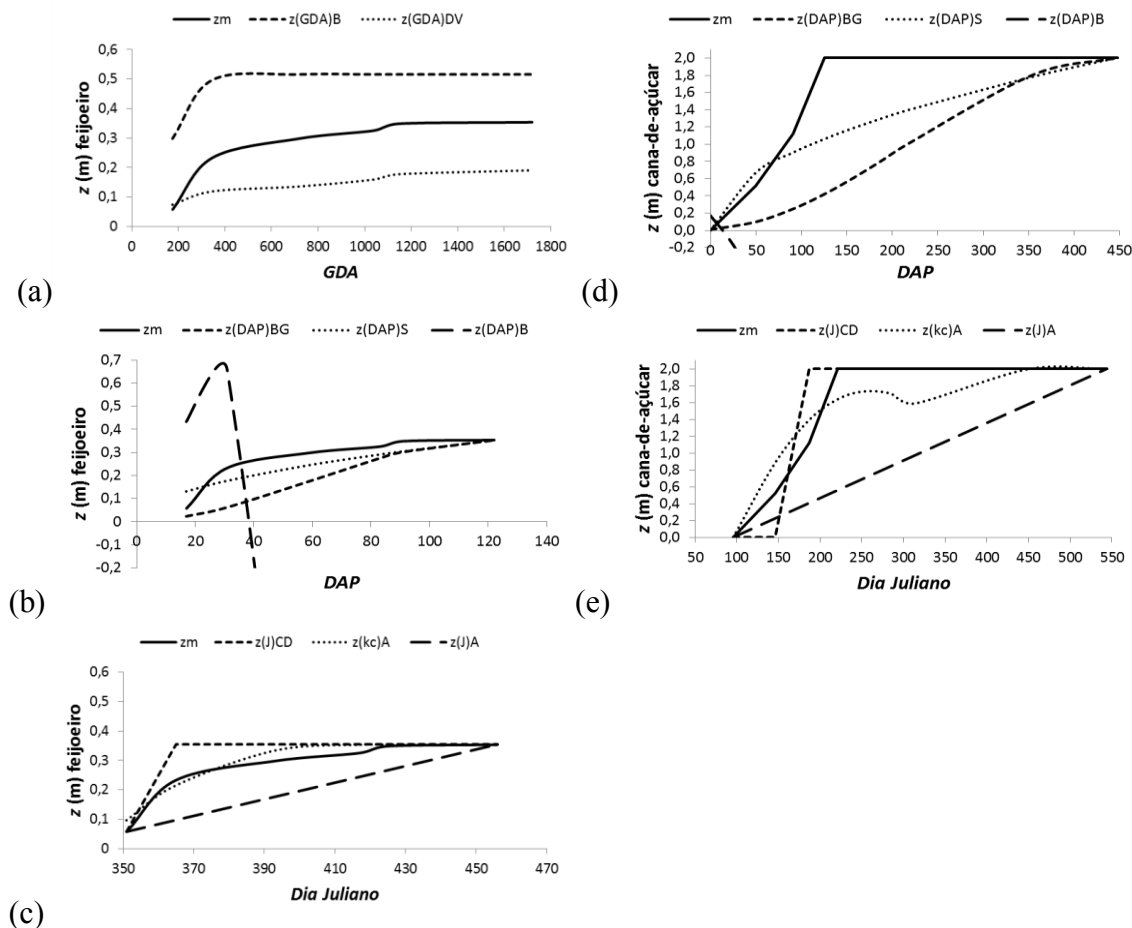


A desvantagem de modelos que utilizam apenas uma variável, como o  $z(DAP)_B$ , está na limitada abrangência, sendo próprios para determinado grupo de culturas, pois somente considera o tempo da cultura no campo, ou seja, os valores de  $z$  foram os mesmos para as diferentes culturas, que possuem porte e ciclo diferenciados. Em contrapartida, modelos com a variável  $GDA$  foram abrangentes, porque cada cultura possui temperatura base específica e cada local tem condições climáticas próprias que permitem acumular os  $GDA$  (GADIOLI et al., 2000).

Não foi possível realizar análises com os modelos  $z(GDA)_B$  e  $z(GDA)_{DV}$  para a cana-de-açúcar, porque não houve contabilização dos  $GDA$  (Figura 2).



**Figura 2.** Profundidade efetiva do sistema radicular medida ( $z_m$ ) e estimada com os modelos propostos, referentes a graus-dia acumulado ( $GDA$ ), dias após plantio ( $DAP$ ) e dias julianos ( $J$ ), sendo: (a), (b) e (c) dados referentes ao feijoeiro em Santa Maria-RS (PARIZI, 2010) e; (d) e (e) dados referentes à cana-de-açúcar em Paranavaí-PR (IDO et al., 2006).



O modelo  $z(DAP)_B$  apresentou os maiores erros e os piores índices de desempenho para todas as culturas estudadas (Tabela 2). Este modelo não foi testado por outros autores, porque, a princípio, foi descrito para a cultura da alface, reforçando a ideia de que modelos que utilizam  $DAP$  são específicos e válidos localmente. Para a cultura do feijoeiro, os modelos que utilizam  $GDA$  como variável não tiveram bom desempenho quanto os que utilizam  $DAP$  ou  $J$ . O resultado indicou que a cultura do feijoeiro não é tão responsiva aos  $GDA$  como o milho. Os melhores modelos para estimativa da  $z$  do feijoeiro foram  $z(kc)_A$ ,  $z(J)_{CD}$  e  $z(J)_A$ , respectivamente.

Para o milho houve resultados semelhantes nos dois tipos climáticos, sendo os melhores modelos:  $z(kc)_A$ ,  $z(DAP)_{BG}$  e  $z(DAP)_S$ , respectivamente. No entanto, faz-se importante destacar que houve divergência entre modelos de acordo com o tipo climático para essa cultura.

O modelo sigmoidal  $z(GDA)_{DV}$  apresentou mau desempenho em Santa Maria-RS, mas bom desempenho em Piracicaba-SP. Resultados semelhantes foram encontrados por Dourado Neto, Parlange e Nielsen (1995) e Oliveira, Garcia e Dourado Neto (2000) na mesma região, com três diferentes variedades, concluindo que o modelo expressa de forma adequada a relação funcional entre a soma calórica e a variação do sistema radicular.

**Tabela 2.** Parâmetros estatísticos obtidos da comparação entre as profundidades efetivas do sistema radicular das culturas analisadas, medidos ( $z_m$ ) e estimados com os modelos, para diferentes locais e tipos climáticos.

Parâmetro	Modelos para estimativa da profundidade do sistema radicular							
	$z(DAP)_{BG}$	$z(DAP)_S$	$z(DAP)_B$	$z(GDA)_B$	$z(GDA)_{DV}$	$z(J)_{CD}$	$z(kc)_A$	$z(J)_A$
----- Milho em Piracicaba-SP (Tipo climático B <sub>1r</sub> B' <sub>4a</sub> ' ) -----								
R <sup>2</sup>	0,9999	0,8854	0,5833	0,6506	0,9949	0,6293	0,9657	0,9803
"d"	0,9965	0,9398	0,0012	0,8299	0,9947	0,8400	0,9867	0,9907
"c"	0,9964	0,8844	0,0009	0,6694	0,9922	0,6663	0,9696	0,9810
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Péssimo	Bom	Ótimo	Bom	Ótimo	Ótimo
EM <sup>1</sup>	-0,0277	0,0617	-2,8480	0,0608	-0,0264	0,1375	0,0093	0,0018
EAM <sup>2</sup>	0,0277	0,0853	3,0837	0,1391	0,0264	0,1375	0,0418	0,0353
----- Milho em Santa Maria-RS (Tipo climático B <sub>4r</sub> B' <sub>3a</sub> ' ) -----								
R <sup>2</sup>	0,9043	0,8379	0,1211	0,6826	-0,0194	0,7571	0,9394	0,6970
"d"	0,8928	0,9234	0,0000	0,7892	0,4873	0,9306	0,9686	0,8317
"c"	0,8490	0,8453	0,0000	0,6521	0,0679	0,8097	0,9388	0,6943
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Péssimo	Bom	Péssimo	Muito bom	Ótimo	Bom
EM	-0,1119	-0,0428	-26,3696	0,0382	-0,2544	-0,0055	0,0416	-0,1177
EAM	0,1119	0,0712	26,5862	0,1057	0,2574	0,0609	0,0416	0,1177
----- Feijão em Santa Maria-RS (Tipo climático B <sub>4r</sub> B' <sub>3a</sub> ' ) -----								
R <sup>2</sup>	0,7259	0,7970	0,1731	0,8720	0,8856	0,8105	0,9500	0,6795
"d"	0,8485	0,9242	0,0000	0,4797	0,6029	0,9347	0,9833	0,8321
"c"	0,7229	0,8251	0,0000	0,4479	0,5674	0,8515	0,9584	0,6860
Desempenho	Bom	Muito bom	Péssimo	Mau	Sofrível	Ótimo	Ótimo	Bom
EM	-0,0704	-0,0182	-18,2229	0,2065	-0,1269	0,0349	0,0151	-0,0704
EAM	0,0704	0,0431	18,4881	0,2065	0,1324	0,0349	0,0211	0,0704
----- Cana-de-açúcar em Paranavaí (Tipo climático B <sub>2r2</sub> B' <sub>3a</sub> ' ) -----								
R <sup>2</sup>	0,3754	0,7080	0,0267	----	----	0,8119	0,8762	0,4347
"d"	0,6984	0,8546	0,0000	----	----	0,9523	0,9580	0,7112
"c"	0,4279	0,7190	0,0000	----	----	0,8581	0,8967	0,4689
Desempenho	Mau	Bom	Péssimo	----	----	Ótimo	Ótimo	Mau
EM	-6,6831	-3,3690	-8177,6710	----	----	0,3600	-0,6853	-6,3677
EAM	6,6932	3,6653	8178,0210	----	----	1,4000	1,9598	6,3677

<sup>1</sup> EM – Erro Médio.

<sup>2</sup> EAM – Erro Absoluto Médio.

Por outro lado, o modelo  $z(J)_{CD}$  teve melhor desempenho em Santa Maria-RS, demonstrando bom comportamento do modelo para o tipo climático da região (B<sub>4r</sub>B'<sub>3a</sub>'). Originalmente, Campbell e Diaz (1988) propuseram-no para o trigo, que é cultivado em tipos climáticos parecidos com o da região, indicativo de que o clima pode influenciar mais na  $z$  nos modelos estudados do que o tipo da cultura.

Conclusão contrária a essa afirmativa pode ser considerada analisando os modelos para a cana-de-açúcar em Paranavaí-PR: com tipo climático B<sub>2r2</sub>B'<sub>3a</sub>', considerado parecido com B<sub>1r</sub>B'<sub>4a</sub>' de Piracicaba-SP, os melhores modelos foram os mesmos para o feijoeiro no tipo climático B<sub>4r</sub>B'<sub>3a</sub>', quais sejam  $z(kc)_A$  e  $z(J)_{CD}$   $z(J)_A$ , respectivamente. Portanto, mesmo em clima diferentes, estes dois modelos foram os melhores tanto para a cana-de-açúcar como para o feijoeiro.

No entanto, há outros fatores que influenciam a  $z$ , Borg e Grimes (1986) afirmaram que a curva de crescimento radicular é específica para as condições em que é realizado o experimento, a qual depende das interações entre solo, planta, manejo e clima.

Por fim, para todas as culturas estudadas, o modelo  $z(kc)_A$  teve melhor desempenho. O conceito de  $kc$  diário traduz as mudanças ocorridas diariamente nas condições fisiológicas da planta e edafoclimáticas da região, que por sua vez influenciam diretamente no comportamento

da  $z$  (ALLEN et al., 1998). No entanto, é importante considerar que a estimativa do  $kc$  diário pode ser realizada de diversas maneiras e possui uma série de pontos controversos, conforme descrito em Gurski et al. (2016), que podem levar a variações.

Segundo Evett et al. (2012), a generalização da  $z$  prejudica o cálculo do balanço hídrico, pois a capacidade de água disponível ( $CAD$ ) é assumida constante em todo o volume de controle em qualquer momento. Quanto mais periodicizado os dados de entrada do balanço hídrico melhor sua acurácia e precisão (GURSKI et al., 2016).

De forma geral, os modelos testados não se mostraram genéricos e aplicáveis a todos os locais e culturas, mas permitiram propor alternativas para obter a  $CAD$  em função de  $z$ , que podem melhorar as estimativas do balanço hídrico agrícola.

## 6 CONCLUSÕES

O melhor modelo para a estimativa diária da profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, feijoeiro e milho, nos diferentes tipos climáticos estudados, foi o modelo que utiliza os valores de coeficiente de cultivo diário;

O modelo que utiliza dias após plantio proposto por Borcioni foi insatisfatório para o monitoramento diário de todas as culturas e tipos climáticos estudados;

Os modelos que utilizam dias após plantio, dias julianos e graus-dia acumulado foram satisfatórios em parte, de acordo com a cultura e tipo climático em questão.

## 7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

BORCIONI, E. **Equações de estimativa do crescimento do sistema radicular e produção de fitomassa de alface hidropônica**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BORG, H.; GRIMES, D. W. Depths development of roots with time: an empirical description. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 29, p. 194-197, 1986.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 5, p. 89-97, 1997.

CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru: ICRISAT, 1988. p. 15-26.

DOURADO NETO, D.; PARLANGE, M. B.; NIELSEN, D. R. **Mechanistic model to forecast yield for a nonphotosensitive annual crop**. Davis: University of California. Department of Land, Air and Water Resources, 1995. 27 p.

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. J. **Programa para elaboração do balanço hídrico para culturas anuais e perenes**. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Agricultura, 1991. 58p.

DRECHSEL, P.; HEFFER, P.; MAGEN, H.; MIKKELSEN, R.; WICHELNS, D. **Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification**. Paris: International Water Management Institute, 2015.

EVETT, S. R.; SCHWARTZA, R. C.; CASANOVA, J. J.; HENG, L. K. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. **Agricultural Water Management**, Auckland, v. 104, p. 1-9, 2012.

GADIOLI, J. G.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA Y GARCÍA, A.; BASANTA, M. V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, p. 377-383, 2000.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; ARMINDO, R. A. Specific adjustment functions for daily crop coefficient in Brazil. **International Journal of Current Research**, Nova Deli, v. 8, n. 8, p. 35537-35542, 2016.

HERMES, C. C.; MEDEIROS, S. L. P.; MANFRON, P. A. Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular na cultura de milho em função de graus-dia acumulados. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 11, p. 327-332, 2003.

IDO, O. T.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; BUSO, P. H. M.; OLIVEIRA, R. A. Crescimento e distribuição radicular de três variedades cultivares de cana-de-açúcar, em cana-soca, em dois tipos de solo, em Rizotron, i. uso do Winrhizo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 7, p. 21-26, 2006.

OLIVEIRA, O. J.; GARCIA, A. G.; DOURADO NETO, D. Modelo co-senoidal referente à curva de crescimento do sistema radicular da cultura de milho (*Zeamays L.*) sob irrigação em condições de campo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, p. 197-204, 2000.

PARIZI, A. R. C. **Funções de produção das culturas de milho e feijão através de estudo experimental e simulado**. 2010. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2012. 511 p.

SCHOUWENAARS, J. M. Rainfall irrigation and sowing strategies in southern Mozambique. **Agriculture Water Management**, Auckland, v. 13, p. 49-64, 1988.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geophysical Review**, Malden, n. 38, p. 55-94, 1948.

VILLA NOVA, N. A.; PEDRO JUNIOR, M. J.; PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das

temperaturas: máximas e mínimas. **Caderno de Ciências da Terra**, Piracicaba, v. 30, p. 01-07, 1972.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Malden, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

ZHANG, X.; CHEN, S.; SUN, H.; WANG, Y.; SHAO, L. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. **Field Crops Research**, Aberdeenshire, v. 114, p. 75-83, 2009.