

ISSN 0104-1347

Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular na cultura de milho em função de graus-dia acumulados

Effective root growth depth model of the maize crop as function as accumulated degrees-day

Paulo Augusto Manfron^{1,7}, Osny Oliveira Santos Bacchi^{2,7}, Durval Dourado Neto^{3,7}, Antônio Roberto Pereira^{4,7}, Sandro Luis Petter Medeiros⁵ e Felipe Gustavo Pilau⁶

Resumo – O manejo racional do solo é importante para o crescimento e distribuição radicular favorecendo o aproveitamento eficiente de água no processo produtivo. O modelo proposto é uma modificação do modelo de BORG & GRIMES (1986), e foi comparado aos modelos de BORG & GRIMES (1986), RASMUSSEN & HANKS (1978), SCHOUWENAARS (1988), que propõem modelos sigmoidais para a determinação da profundidade efetiva do sistema radicular, e os modelos sigmoidais de DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1991) e SUBBAIAH & RAO (1993) que sugerem a utilização de parâmetros empíricos para explicar a inter-relação de cultura com o meio. O modelo proposto de simulação de crescimento radicular foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura de milho, levando em consideração a minimização da soma dos quadrados dos resíduos e os valores extremos de profundidade efetiva do sistema radicular (valores inicial e final).

Palavras-chave: modelagem, distribuição radicular, índice térmico.

Abstract – The rational soil management is important for root growth related to efficient water use in the agricultural production system. The proposed model is a modification of the BORG & GRIMES (1986) model. It was compared with the BORG & GRIMES (1986), RASMUSSEN & HANKS (1978) and SCHOUWENAARS (1988) sigmoidal models and with the models proposed by DOURADO NETO (1991) and SUBBAIAH & RAO (1993) that use empirical parameters to explain the relationship between crop and environment. The proposed model for root growth simulation was the best to fit the experimental data using maize crop relative development as independent variable, minimizing the SQE and computing the extreme values of initial and final effective root depth values.

Key words: modeling, root distribution, thermic index.

Introdução

Os modelos procuram representar processos que ocorrem num sistema real, podendo simulá-los, e esses podem ser determinísticos ou estocásticos (DOURADO NETO, 1999).

A variação temporal do crescimento e desenvolvimento radicular pode ser modelada utilizando modelos empíricos ou mecânicos (SUBBAIAH & RAO, 1993).

A quantidade de água disponível para a cultura encontra-se na dependência da profundidade ex-

¹ Dr. Prof. Titular. Departamento de Fitotecnia, CCR, UFSM, Santa Maria, RS. manfron@ccr.ufsm.br

² Dr. Prof. Laboratório de Física do Solo. CENA-USP. Piracicaba, SP. osny@cena.usp.br

³ Dr. Prof. Associado do Departamento de Produção Vegetal. -ESALQ-USP. Piracicaba, SP. dourado@esalq.usp.br

⁴ Dr. Prof. Titular do Departamento de Ciências Exatas. ESALQ-USP. Piracicaba, SP. arpereir@esalq.usp.br

⁵ Dr. Prof. Adjunto Departamento de Fitotecnia, CCR, UFSM, Santa Maria, RS. sandro@ccr.ufsm.br

⁶ Engenheiro Agrônomo. Doutorando em Física do Ambiente Agrícola. ESALQ-USP. fgpilau@esalq.usp.br

⁷ Bolsista CNPq.

plorada pelas raízes; da capacidade de armazenamento de água do solo; e, da densidade radicular da planta. Assim, o manejo racional do solo e da cultura apresenta importância para o crescimento e distribuição do sistema radicular, favorecendo o aproveitamento eficiente da água no processo produtivo. A ocorrência de moderadas deficiências de água, no início do desenvolvimento da cultura, pode concorrer para estimular um maior desenvolvimento radicular das plantas, desde que o solo, abaixo de 20 cm da superfície, tenha água armazenada e disponível para as plantas.

A profundidade efetiva de raízes raramente ultrapassa 30 cm em regiões tropicais, podendo ir até abaixo de 1,0m em regiões de clima temperado (SAAD, 1991).

O estudo da profundidade efetiva do sistema radicular de uma cultura requer métodos destrutivos, trabalhosos e muito demorados. Com o objetivo de simplificar tal avaliação, desenvolveu-se um método prático computacional para estimar a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura de milho em função de graus-dia acumulados ao longo do período de cultivo.

Material e métodos

O modelo proposto é uma modificação do modelo apresentado por BORG & GRIMES (1986) [equação (1)] para a estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular.

$$Ze_i = Ze_{\max} \left[0,50 + 0,50 \operatorname{sen} \left(3,03 \cdot \frac{\text{DAS}}{\text{DMF}} - 1,47 \right) \right] \quad (1)$$

em que Ze_i é a profundidade efetiva do sistema radicular no i -ésimo dia após a semeadura; Ze_{ini} é a profundidade inicial do sistema radicular; Ze_{\max} é a profundidade máxima do sistema radicular; DAS é o número de dias após a semeadura; DMF é o número de dias da semeadura até o ponto de maturidade fisiológica da cultura. Mesmo não sendo lineares, esses modelos precisam apenas levar em consideração a profundidade inicial (Ze_{ini}) e máxima (Ze_{\max}), no qual não são verificadas as restrições discutidas anteriormente.

No modelo sugerido [equações (2) e (3)], o coeficiente empírico β é dependente dos parâmetros

que afetam o desenvolvimento das raízes, sendo específico para cada ambiente.

$$Ze_i = Ze_{\text{ini}} + (Ze_{\max} - Ze_{\text{ini}}) \left[0,5 - 0,5 \operatorname{sen} \left(\frac{\beta \text{GD}_i}{\alpha \text{GDT}} - \frac{\beta}{2} \right) \right]^b \quad (2)$$

se ($\text{GDI} < \alpha \cdot \text{GDT}$)

ou

$$Ze_i = Ze_{\max} \quad \text{se } (\text{GDi} = \alpha \cdot \text{GDT}) \quad (3)$$

em que: GDi é a soma calórica ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$) até o i -ésimo dia após a semeadura; e GDT a soma calórica ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$) até ser atingido o ponto de maturidade fisiológica. A fração αGDT representa a soma calórica ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$) até ser atingida a profundidade máxima do sistema radicular (Ze_{\max}), sendo α o desenvolvimento relativo correspondente à mesma. A relação GDi/GDT , corresponde então ao desenvolvimento relativo (Dr_i) da cultura.

Quando $\text{GDi} \geq \alpha \text{GDT}$, aplica-se a equação (3) para os modelos propostos por DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1991), SUBBAIAH & RAO (1993) e o modelo sugerido.

O modelo proposto foi validado e comparado aos modelos propostos por RASMUSSEN & HANKS (1978) [equação (4)], BORG & GRIMES (1986) [equação (1)] e SCHOUWENAARS (1988) [equação (5)].

$$Ze_i = \frac{Ze_{\text{ini}} + (Ze_{\max} - Ze_{\text{ini}})}{1 + \exp \left[\text{FA} - \text{FB} \cdot \left(\frac{\text{DAS}}{\text{DMF}} \right) \right]} \quad (4)$$

$$Ze_i = Ze_{\max} \cdot \left(\frac{\text{DAS}}{\text{DTC}} \right)^{0,50} \quad (5)$$

em que DAS representa o número de dias após a semeadura, DMF o número de dias da semeadura até o ponto de maturidade fisiológica da cultura, DTC a duração (dias) do ciclo da cultura; FA e FB coeficientes empíricos em função da cultura. Mesmo não sendo lineares, esses modelos precisam apenas de Ze_{ini} e Ze_{\max} nas quais também não são consideradas as restrições discutidas anteriormente. E também DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1991) [equação

6] e SUBBAIAH & RAO (1993) [equação 7] sugerem modelos sigmoidais para a simulação do crescimento da raiz propondo a utilização de parâmetros empíricos para explicar a inter-relação da cultura com o meio:

$$Z_{e_i} = Z_{e_{ini}} + \left(\frac{Z_{e_{max}} - Z_{e_{ini}}}{2} \right) \left[1 - \cos \left(p^{1/F} \cdot \frac{GD_i}{aGDT} \right)^F \right] \quad (6)$$

(Se $GD_i < aGDT$)

$$Z_{e_i} = Z_{e_{ini}} + (Z_{e_{max}} - Z_{e_{ini}}) \cdot \left(\frac{DAS}{DMF} \right)^k \quad (7)$$

em que F e k são fatores de forma da curva de crescimento radicular e dependem dos parâmetros que afetam o crescimento das raízes. Esses coeficientes devem ser determinados por meio de análise de regressão para cada tipo particular de solo, planta e prática de manejo numa dada área geográfica durante uma época particular.

Os resultados obtidos foram comparados pelos modelos aos dados observados utilizando os resultados obtidos na cultura de milho (*Zea mays* L.) num solo classificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico, na área experimental da ESALQ, USP, em Piracicaba, SP (22°42' S, 47°38' W e 546 m de altitude).

A semeadura foi realizada com três híbridos (C-901, C-333-B e C-806), em 20/10/1997, sendo a colheita em 11/03/1998. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Cada repetição foi constituída de 3,6 m de largura (4 linhas com espaçamento de 0,9 m) com 30 m de comprimento. Foi utilizada uma área de 108 m² por repetição, em populações de 60.000 plantas/ha, 50.000 plantas/ha e 50.000 plantas/ha, respectivamente.

A amostragem do sistema radicular das plantas de milho foi realizada a campo de forma aleatória, mesmo constatando a não uniformidade no crescimento e desenvolvimento das plantas da área experimental, o que poderia influenciar nos resultados obtidos. Para minimizar a variabilidade dos dados coletados para estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular dos híbridos estudados foram amostradas 5 plantas por híbrido em cada repetição, nas quais foram utilizados, na análise de regressão, os valores médios.

O ciclo da cultura foi caracterizado pela soma calórica (°C.dia), conforme a aproximação pelo mé-

todo direto proposta por GILMORE & ROGERS (1958). Os fatores de forma dos diferentes modelos foram determinados pela de análise de regressão não linear, com os pares de dados ($GD_i/\alpha GDT$) versus Z_{e_i} , utilizando o método dos mínimos quadrados e o procedimento iterativo de Newton-Raphson; que minimiza a soma dos quadrados dos desvios em relação aos valores medidos e estimados da profundidade efetiva do sistema radicular.

Resultados e discussão

Para efeito de estimativa de armazenamento de água disponível, assume-se o crescimento em profundidade do sistema radicular na camada de solo, responsável por cerca de 95% da evapotranspiração (camada de solo referente à zona ativa das raízes), denominada profundidade efetiva do sistema radicular.

A relação temporal da curva de crescimento do sistema radicular simulada com os diferentes modelos é apresentada na Figura 1, na qual se pode verificar que, a partir de 83 DAS, a profundidade efetiva do sistema radicular é constante e igual à profundidade efetiva máxima.

Observa-se que o modelo exponencial de SCHOUWENAARS (1988) é o que menos se ajusta aos dados medidos no campo, com tendência a superestimar a profundidade efetiva do sistema radicular desde os primeiros estádios da cultura até, aproximadamente 60 dias após a semeadura, e subestimando Z_e nas etapas próximas ao desenvolvimento relativo (α) correspondente à profundidade máxima atingida pela cultura.

A mesma tendência é observada no modelo proposto por SUBBAIAH & RAO (1993), mas menos acentuada na Zona I, que corresponde ao subperíodo vegetativo da cultura.

O modelo de SCHOUWENAARS (1988) e o de BORG & GRIMES (1986) apresentaram as maiores diferenças entre os valores simulados e os observados no campo para a profundidade máxima da raiz. Esse segundo modelo subestimou a profundidade de raiz ao longo do ciclo da cultura, sendo ainda menos consistente nos primeiros 20 dias após a semeadura.

A proposta de RASMUSSEN & HANKS (1978) superestima o crescimento radicular nos primeiros 15 dias após a semeadura, tendo um decréscimo na estimativa quando se aproxima a etapa de de-

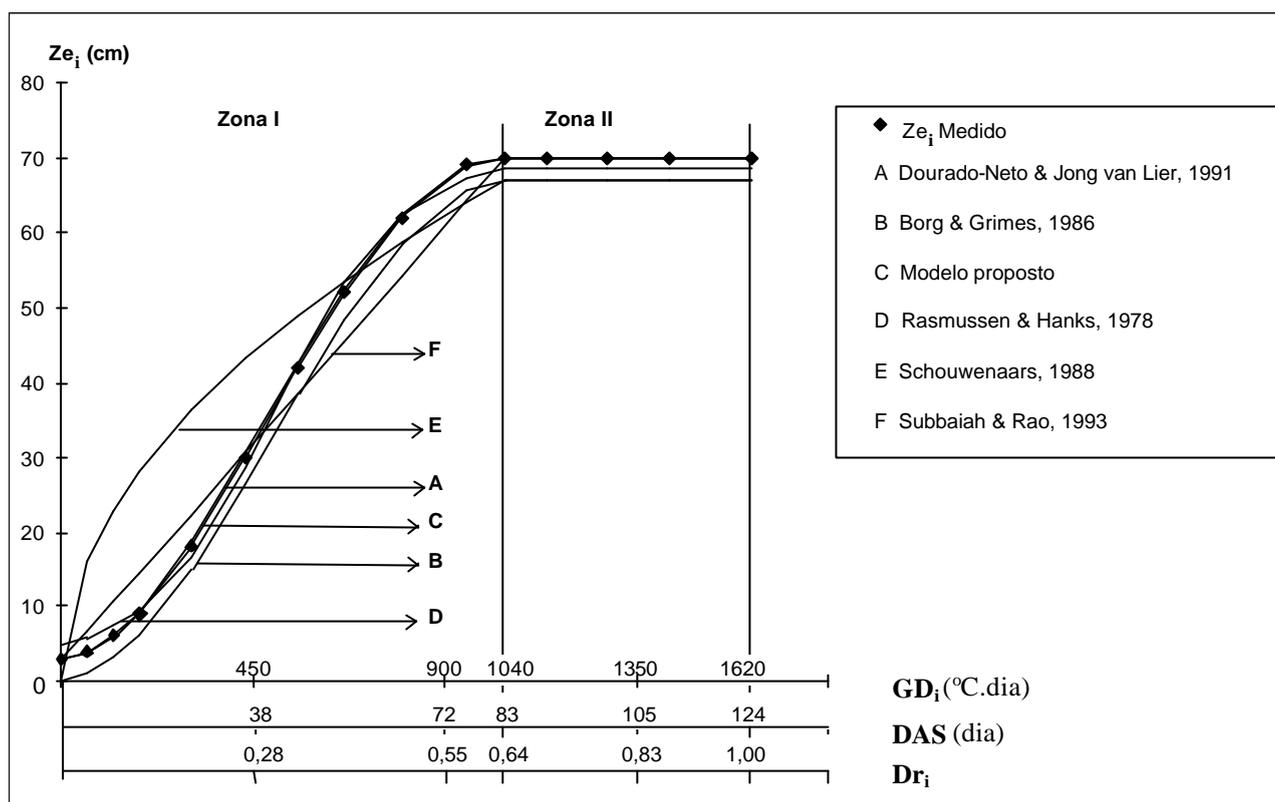


Figura 1. Relação temporal da curva de crescimento do sistema radicular do milho com os diferentes modelos de simulação utilizados, em termos de: graus-dia (GD_i , °C.dia), dias após a semeadura (DAS, dia) e desenvolvimento relativo (Dr_i).

envolvimento relativo correspondente a profundidade máxima do sistema radicular. O melhor ajuste foi obtido com o modelo sugerido no presente trabalho e com a proposta de DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1991). Ambos os modelos apresentaram um excelente ajuste aos dados medidos no campo ao longo do ciclo da cultura. Os valores de Ze simulados com os diferentes modelos são apresentados na Tabela 1, em que se observa a precisão obtida com a modificação do modelo de BORG & GRIMES (1986).

O coeficiente de determinação e o valor F (teste de F) foram calculados para Zona I. O alto valor de F indica uma boa aderência (maior exatidão do modelo em relação aos outros quando comparado com os dados medidos no campo). Como em todos os modelos, a partir do momento em que a profundidade efetiva máxima do sistema radicular foi atingida, a profundidade efetiva permanece constante (motivo pelo qual não se fez análise estatística para a Zona II).

Na Tabela 2, observa-se que o modelo de DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1991) apresenta um bom ajuste aos dados medidos no

campo. O modelo proposto por SCHOUWENAARS (1988) apresentou o menor valor de F e de coeficiente de determinação, sendo que SUBBAIAH & RAO (1993) obtiveram resultados semelhantes num estudo comparativo entre diferentes modelos para a simulação de crescimento radicular. A exatidão dos dados simulados em relação aos dados medidos também pode ser verificada nesta tabela. Praticamente, o coeficiente de determinação é similar nos diferentes modelos quando comparados cada um deles com os dados medidos no campo. Porém, o quadrado médio dos resíduos demonstra que, além desse modelo, as propostas de RASMUSSEN & HANKS (1978) e de SUBBAIAH & RAO (1993) são menos exatas para a simulação do crescimento radicular. O menor quadrado médio dos resíduos foi apresentado pelo modelo sugerido; seguido das propostas de DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1991) e BORG & GRIMES (1986).

Estatisticamente, o teste F definiu que todos os modelos são altamente significativos, mas deve considerar-se que as propostas de SCHOUWENAARS (1988), SUBBAIAH & RAO

Tabela 1. Valores da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_{e_i} , cm) simulados com os diferentes modelos em função da soma calória até o *i*-ésimo dia após a semeadura (GD_i , °C.dia).

DAS ¹ (dia)	GD _i (°C.dia)	Z _{e_i} (cm) medido	Z _{e_i} (cm) Simulado pelo modelo ²					
			A	B	C	D	E	F
0	0,00	3	3,00	0,17	3,00	4,90	0,00	3,00
5	59,65	4	3,79	1,25	3,79	5,85	16,04	6,69
10	122,48	6	5,99	3,45	5,96	7,32	22,99	10,66
15	181,54	9	9,14	6,42	9,04	9,33	27,99	14,41
26	306,77	18	18,51	15,24	18,20	16,44	36,38	22,42
36	434,32	30	30,45	26,68	29,95	28,49	43,29	30,63
46	556,67	42	42,52	38,55	41,96	42,64	49,01	38,54
54	663,03	52	52,31	48,40	51,82	53,48	53,49	45,43
63	799,17	62	62,42	58,83	62,13	62,50	58,72	54,28
76	952,78	69	68,98	65,82	68,93	67,24	64,12	64,28
83	1040,42	70	70,00	67,00	70,00	68,48	67,00	70,00

¹DAS=Dias após a semeadura²A = DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1991); B = BORG & GRIMES (1986); C = Modelo proposto; D = RASMUSSEN & HANKS (1978); E = SCHOUWENAARS (1988); F = SUBBAIAH & RAO (1993).

(1993), BORG & GRIMES (1986) e RASMUSSEN & HANKS (1978) superestimaram ou subestimaram a profundidade efetiva do sistema radicular em certas etapas do seu desenvolvimento, o que pode ser verificado pelos valores dos coeficientes linear (a) e angular (b) da análise de comparação (Tabela 2).

Na Figura 2, os valores observados com os simulados são comparados. A maioria dos modelos tem um bom ajuste com os dados observado, mas o erro padrão é maior nos modelos de SCHOUWENAARS (1988) e SUBBAIAH & RAO (1993), como pode ser visto na Figura 2(e) e na Figura 2(f).

Na natureza, o desenvolvimento do sistema radicular das plantas no tempo não é necessariamente

te linear, pois as restrições inerentes ao solo como camadas de impedimento, textura, densidade e conteúdo de água, além do evidente crescimento rápido na primeira fase da cultura (SUBBAIAH & RAO, 1993) têm como resultado um crescimento lateral que não é explicado por esses modelos lineares. Uma melhor aproximação é propor modelos que considerem essas restrições.

Conclusão

O modelo proposto de simulação de crescimento radicular foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais ao longo do ciclo de desenvolvi-

Tabela 2. Quadrado médio dos resíduos (QMRes), teste F, coeficientes linear (a) e angular (b) correspondentes à análise estatística comparativa dos modelos (Figura 2) e coeficiente de determinação (r^2) referentes à Zona I.

Parâmetro	Modelo ¹					
	A	B	C	D	E	F
QMRes	0,07034	0,07622	0,01565	1,79319	52,16900	9,79532
Teste F	103191 ²	93156 ²	461843 ²	3813 ²	78 ²	556 ²
a	0,11944	-2,72431	-0,02196	1,05865	14,96177	3,94089
b	1,00216	0,99114	1,00007	0,97267	0,75189	0,86844
r^2	0,99991	0,99990	0,99998	0,99765	0,94707	0,99201

¹A=DOURADO-NETO & JONG-VAN-LIER (1991); B = BORG & GRIMES (1986); C = Modelo proposto; D = RASMUSSEN & HANKS (1978); E = SCHOUWENAARS (1988); F = SUBBAIAH & RAO (1993).²Significativo ao nível de probabilidade de 1% para todos os modelos.

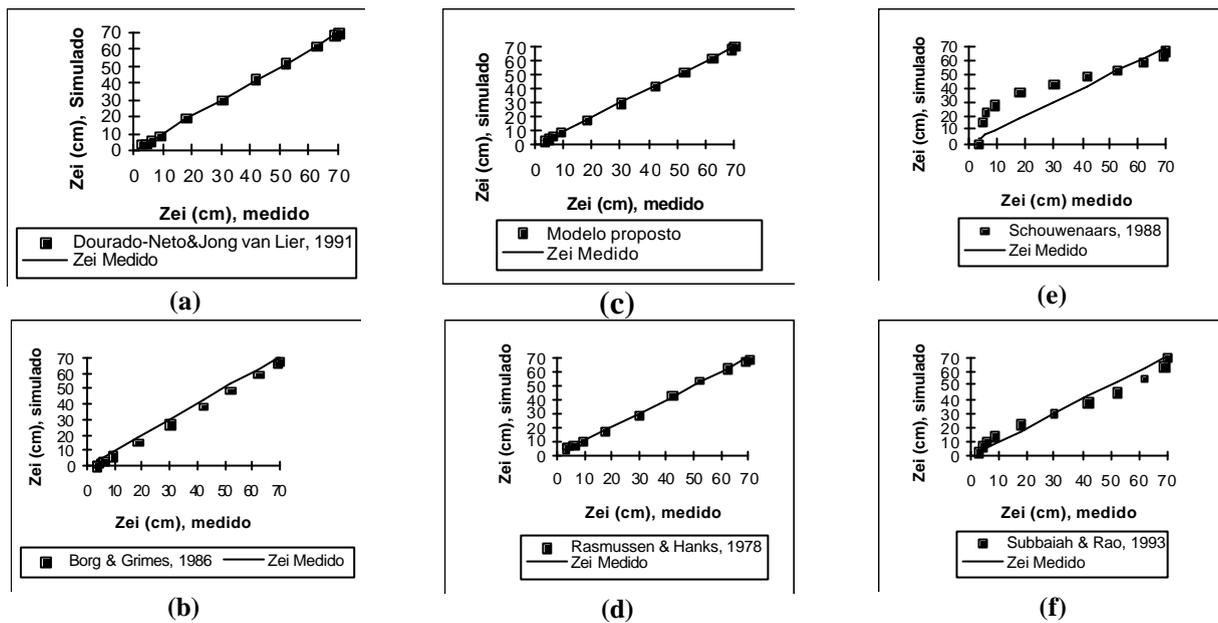


Figura 2. Comparação dos valores simulados com os valores observados de profundidade efetiva do sistema radicular (linha 1:1) referentes à Zona I.

mento da cultura de milho, levando em consideração conjuntamente o quadrado médio dos resíduos, o teste F, o coeficiente de determinação e, principalmente, os coeficientes linear e angular correspondentes à análise comparativa dos modelos referentes à Zona I.

Referências bibliográficas

- BORG, H.; GRIMES, D.W. Depths development of roots with time: an empirical description. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 29, n. 1, p. 194-197, 1986.
- DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de. **Programa para elaboração do Balanço hídrico para culturas anuais e perenes**. Piracicaba, Departamento de Agricultura-ESALQ, 1991. 58 p. (Manual do usuário).
- DOURADO NETO, D. **Modelos fitotécnicos referentes à cultura de milho**. Piracicaba: Departamento de Agricultura, 1999. 229 p.

GILMORE, E.; ROGERS, J.S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, p. 611-615, 1958.

RASMUSSEN, V.P.; HANKS, R.J. Spring wheat yield model for limited moisture conditions, **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 940-944, 1978.

SAAD, A.M. **Uso do tensiômetro no controle da irrigação por pivô central**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1991. 141 p. (Dissertação de Mestrado em Irrigação e Drenagem), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, 1991.

SCHOUWENAARS, J.M. Rainfall irrigation and sowing strategies in southern Mozambique. **Agriculture Water Management**, Amsterdam, v. 13, n. 1, p. 49-64, 1988.

SUBBAIAH, R.; RAO, K.A. Root growth simulation model under specified environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Aragon, v. 119, n. 5, p. 898-905, 1993.