

MODELO CO-SENOIDAL REFERENTE À CURVA DE CRESCIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA DE MILHO (*Zea mays L.*) SOB IRRIGAÇÃO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

OSVALDO JOSÉ DE OLIVEIRA¹

AXEL GARCIA Y GARCIA²

DURVAL DOURADO NETO³

RESUMO - Com o objetivo de determinar o fator de forma da curva de crescimento do sistema radicular da cultura de milho irrigado, foi conduzido um experimento na área do Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, no período de 13 de setembro de 1996 a 15 de janeiro de 1997,

utilizando-se três materiais de milho. Assumiu-se um modelo co-senoidal para representar a relação funcional entre a profundidade efetiva do sistema radicular e a soma calórica, e foram determinados os fatores de forma: 0,942; 0,944 e de 0,946 para os materiais CMS-54, CMS-36 e POOL-18, respectivamente.

TERMOS PARA INDEXAÇÃO: Raiz, fator de forma, milho, modelagem.

COSINE'S MODEL TO REPRESENT THE MAIZE (*Zea mays L.*) ROOT GROWTH CURVE UNDER IRRIGATION AT FIELD CONDITIONS

ABSTRACT - With the purpose of estimating maize root growth curve shape factor, an experiment was carried out under irrigation at Departament of Vegetable Production, University of São Paulo, from september 13, 1996 to january 15, 1997, where tree corn materials

were used. A cosines model was used to represent the functional relationship between effective root depth and the thermic index, where the shape factors: 0.942, 0.944 and 0.946 were estimated for CMS-54, CMS-36 and POOL-18 materials, respectively.

INDEX TERMS: Root, shape factor, maize, modeling

INTRODUÇÃO

Na elaboração do balanço hídrico durante o ciclo de uma cultura, a profundidade efetiva do sistema radicular é importante na quantificação da lâmina necessária à planta num determinado estádio de crescimento e desenvolvimento, além de subsidiar a verificação da necessidade da adoção da irrigação.

No Brasil, existe evidente escassez de estudos sobre crescimento radicular e isso pode ser atribuído ao fato de a metodologia ser bastante trabalhosa. A informação a ser obtida neste estudo é de grande importância para o manejo da água em sistemas agrícolas, definição da fertilidade do solo em função do rendimento almejado e da população de plantas da espécie mais exigente do sistema de produção, zoneamento agrícola, balanço hídrico, dentre outras finalidades.

1. Doutor em Irrigação e Drenagem, Professor da Escola Agrotécnica Federal de Cuiabá-MT, BR 364, Km 329. São Vicente da Serra. 78.106-000 - Cuiabá-MT, E-mail: ojolivei@zaz.com.br.
2. Doutorando em Agricultura, Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Rua Almerindo de Almeida, 35 - Bairro Alvorada. Cuiabá-MT. 78.048-550. e-mail: aggarcia@carpa.ciagri.usp.br.
3. Professor Doutor, Departamento de Produção Vegetal, ESALQ/Universidade de São Paulo. Caixa Postal 9, Piracicaba, SP, 13.418-900. Pesquisador CNPq.

Por outro lado, a simulação do sistema radicular foi viabilizada com o advento da informática. A modelagem da variação temporal da arquitetura radicular utilizando a dimensão fractal ou modelos estatísticos tem sido recentemente utilizada (Dourado Neto *et al.*, 1995).

Sendo a variação temporal da profundidade efetiva do sistema radicular fundamental para melhor estimar o consumo de água pela cultura de interesse, a abordagem de uma única raiz representa uma planta média de uma população que apresenta distribuição normal.

Para a estimativa da profundidade efetiva do sistema radicular, propõe-se uma curva de crescimento padrão para a cultura de milho obtida com base na observação prévia da variação temporal da profundidade efetiva do sistema radicular sob irrigação, caracterizando o fator de forma da curva de crescimento radicular.

Muitos trabalhos têm sido feitos para aprimorar técnicas e métodos no intuito de entender a relação entre o crescimento da raiz e os fatores que afetam o seu desenvolvimento, tais como: tipo de solo, cultura, meio e estratégias de manejo (Subbaiah & Rao, 1993). Por exemplo, Bennet & Doss (1960) verificaram que o desenvolvimento em profundidade do sistema radicular varia em razão inversa da variação do conteúdo de água no solo, desde que o conteúdo de água esteja acima das condições mínimas exigidas para o crescimento.

Assumindo que a profundidade máxima do sistema radicular (Ze_{\max}) é uma fração f da profundidade real máxima (Zr_{\max}) do sistema radicular observável em condições de campo, Driessen (1986) cita que essa relação pode ser expressa por:

$$Ze_{\max} = f \cdot Zr_{\max} \quad (1)$$

O mesmo autor propõe um modelo linear (equação 2) para simular a variação temporal do crescimento radicular em que a profundidade efetiva do sistema radicular no i -ésimo dia (Ze_i) varia linearmente a partir de um valor inicial (Ze_{ini}), até atingir a profundidade máxima (Ze_{\max}), permanecendo constante e igual ao valor máximo (equação 2a), até ser atingido o ponto de maturidade fisiológica.

Por outro lado, a simulação do sistema radicular foi viabilizada com o advento da informática. A modelagem da variação temporal da arquitetura radicular utilizando a dimensão fractal ou modelos estatísticos tem sido recentemente utilizada (Dourado Neto *et al.*, 1995).

$$Ze_i = Ze_{\text{ini}} + \frac{(Ze_{\max} - Ze_{\text{ini}})}{0,7GDT} \cdot GDi \quad (\text{se } GDi < 0,7GDT) \quad (2)$$

$$Ze_i = Ze_{\max}; \quad (\text{se } GDi \geq 0,7GDT) \quad (2a)$$

em que GDi é a soma calórica ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$) no i -ésimo dia após a semeadura, e GDT é a soma calórica ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$), até ser atingido o ponto de maturidade fisiológica. A fração $0,7GDT$ representa a soma calórica ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$) para ser atingida a profundidade máxima do sistema radicular. A relação $GDi/(0,7GDT)$ corresponde, então, ao desenvolvimento relativo (Dri) da cultura.

Dourado Neto & Jong van Lier (1991) sugerem modificações nas expressões desses modelos. Segundo esse autores, a profundidade efetiva do sistema radicular, além da adoção de um crescimento linear, pode ser assumida como um crescimento de forma potencial ou sigmoidal a partir de um valor inicial até atingir um valor máximo, permanecendo constante e igual a esse valor máximo até atingir o ponto de maturidade fisiológica, e no último estádio, a profundidade efetiva do sistema radicular pode decrescer seguindo uma dessas três possibilidades: linear, potencial ou sigmoidal.

As expressões matemáticas para simulação do desenvolvimento radicular propostas por Dourado Neto & Jong van Lier (1991) são apresentadas nas equações (3) e (3a) para os modelos potencial e linear e, (4) e (4a) para o modelo sigmoidal.

$$Ze_i = Ze_{\text{ini}} + (Ze_{\max} - Ze_{\text{ini}}) \cdot \left(\frac{GDi}{0,7GDT} \right)^F \quad (\text{Se } GDi < 0,7GDT) \quad (3)$$

$$Ze_i = Ze_{\max} \quad (\text{Se } GDi \geq 0,7GDT) \quad (3a)$$

$$Ze_i = Ze_{\text{ini}} + \left(\frac{Ze_{\max} - Ze_{\text{ini}}}{2} \right) \left[1 - \cos \left(\pi \cdot \frac{GDi}{0,7GDT} \right)^F \right] \quad (\text{Se } GDi < 0,7GDT) \quad (4)$$

$$Ze_i = Ze_{\max} \quad (\text{Se } GDi \geq 0,7GDT) \quad (4a)$$

em que F é o fator de forma da curva de crescimento radicular referente aos modelos potencial e linear (equações 3e 3a) ou co-senoidal (equações 4 e 4a).

Se o fator de forma for unitário ($F=1$), significa que o sistema radicular cresce segundo uma função linear com o tempo. Caso o fator de forma seja inferior à unidade ($0,0 < F < 1,0$), significa que o sistema radicular cresce segundo uma função potencial ou co-senoidal com o tempo. Após atingido o valor máximo, assume-se que a profundidade efetiva da raiz permanece constante até o final de seu ciclo, no caso de culturas anuais ou semi-perenes, ou de sua vida útil, no caso de culturas perenes (Dourado Neto, 1996).

Tem-se também a proposta de modelos para serem ajustados a curvas de forma sigmoidal, no intuito de simular o crescimento radicular, tais como os desenvolvidos por Rasmussen & Hanks (1978), Borg & Grimes (1986) e Schouwenaars (1988). Esses modelos utilizam como parâmetros de entrada a profundidade efetiva máxima ($Z_{e_{max}}$) atingida pela cultura e a soma calórica que a planta necessita para alcançar essa profundidade. Ambos os valores são altamente dependentes do tipo de solo, da cultura, do meio e das estratégias de manejo e não levam em conta, nas expressões matemáticas, um coeficiente que integre o efeito desses parâmetros que afetam o desenvolvimento radicular.

Com o presente trabalho, objetivou-se determinar o fator de forma (F) da curva de crescimento do sistema radicular da cultura de milho sob irrigação em condições de campo.

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi conduzido na área experimental do Departamento de Produção vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, com coordenadas geográficas: 22° 43' de latitude sul e 47° 25' lon-

$$GD_n \equiv \sum_{i=1}^n \left[\frac{(T_{min_i} + T_{max_i})}{2} - T_b \right] \text{ para } [T_{max_i} < (T_m) \text{ e } (T_{min_i}) > T_b] \quad (6)$$

em que GD_{pmf} corresponde à soma calórica até atingir o ponto de maturidade fisiológica, $tpmf$ corresponde ao tempo (°C.dia) necessário para atingir o ponto de maturidade fisiológica, T é a temperatura em °C, T_b e T_m referem-se às temperaturas basais mínima e máxima (10°C e 30 °C respectivamente), T_{max_i} e T_{min_i} referem-se às temperaturas máxima e mínima do ar,

atitude oeste e altitude igual a 580 metros. O solo da área experimental é classificado como Terra Roxa Estruturada Eutrófica, horizonte A moderado, textura argilosa a muita argilosa, corresponde ao Kandiudalf Eutródox pela Classificação Americana (Vidal-Torrado & Sparovek, 1983). O clima é subtropical, com chuvas no verão e inverno seco; com as seguintes médias anuais: i) precipitação; 1253mm, ii) temperatura do ar; 21,1°C, iii) umidade relativa do ar 74%, iv) velocidade do vento; 2,2 m.s⁻¹ (com direção E/SE predominante) (Villa Nova, 1989).

No preparo do solo, foi efetuada uma subsolagem, seguida de uma aração e duas gradagens. A correção e adubação foram feitas com base nos resultados da análise química do solo.

A semeadura foi efetuada em 13/9/96, na densidade de 78 sementes para cada 10 metros de linha, realizando posterior desbaste (0,25mx x 0,80m = 50.000 plantas.ha⁻¹). A área bruta foi de 810m² (270m² por material) e os dados foram obtidos na parte central da parcela (300m² com 100m² por material). Utilizaram-se de três materiais genéticos de milho: CMS-54, CMS-36 e POOL-18, os quais foram cedidos pela EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo-CNPMS, Sete Lagoas-MG. Após a instalação do ensaio, efetuaram-se periodicamente inspeções no local para os respectivos tratos culturais.

Para a caracterização do ciclo da cultura, utilizou-se a definição de soma calórica (ou unidades térmicas ou graus dia ou índice térmico).

$$GD_{pmf} = \int_{0^oC}^{tpmf} T(t) dt - T_b \cdot tpn \quad (5)$$

a qual é aproximada, numa escala diária, pelo método direto proposto por Gilmore & Rogers (1958), conforme a relação a seguir.

respectivamente, no i -ésimo dia após a semeadura. Quando $T_{max} > T_m$, para efeito de cálculo, fez-se $T_{max_i} = 30^oC$, bem como se $T_{min_i} < T_b$, fez-se $T_{min_i} = 10^oC$.

Ao longo do ciclo da cultura, construíram-se trincheiras de 1,0m x 0,50m e profundidade variável entre 0,10m x 1,0m. Foram feitas 2 trincheiras por material em cada época de medição em freqüência

variável entre 5 a 13 dias uma da outra. Após feitas as trincheiras, o perfil do solo foi lavado com jato de água para facilitar a medição da profundidade de raiz, utilizando-se a profundidade média do sistema radicular de quatro plantas por material de milho.

Usando regressão não-linear, aplicada ao conjunto de dados obtidos em campo e considerando a

forma sigmoidal do crescimento radicular, caracterizada pela equação 4, foi estimado o valor do fator de forma F do sistema radicular com os pares de dados Dri e Ze pelo método dos mínimos quadrados e o procedimento iterativo de Newton-Raphson.

Procedeu-se então, à minimização da soma dos quadrados dos erros (SQE) no intuito de determinar o valor de F , pela seguinte expressão:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = SQE = \sum_{i=1}^n \left\{ Ze_i - \left[Ze_{min} + \left(\frac{Ze_{max} - Ze_{min}}{2} \right) \left[1 - \cos \left\{ \mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right\} \right] \right] \right\}^2 \quad (7)$$

Derivando-se a equação (7) em relação a F , tornando-a igual a zero, tem-se que:

$$g(f) = \frac{dSQE}{dF} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{I}_i - 2 \sum_{i=1}^n (Ze_i - Ze_{min}) \quad (8)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{p} \cdot \frac{(Ze_{max} - Ze_{min})^2}{2} \quad (9)$$

$$\mathbf{I}_i = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[1 - \cos \left\{ \mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right\} \right] \cdot \sin \left[\mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right] \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \cdot \ln \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right) \right\} \quad (10)$$

Fazendo a derivada da equação (8) (Segunda derivada da equação 7), tem-se:

$$\begin{aligned} g'(f) = & \sum_{i=1}^n \left\{ \mathbf{p} \cdot \frac{(Ze_{max} - Ze_{min})^2}{2} \cdot \left[\left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \cdot \ln^2 \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right) \right] \cdot \left\{ \mathbf{p} \cdot \sin^2 \left[\mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right] \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right. \right. \right. \\ & + \mathbf{p} \cdot \cos \left[\mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right] \cdot \left[1 - \cos \left\{ \mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right\} \right] \cdot \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \\ & \left. \left. \left. + \sin \left[\mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right] \cdot \left\{ 1 - \cos \left[\mathbf{p} \left(\frac{GD_i}{0,7.GD_T} \right)^F \right] \right\} \right\} \right\} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

Utilizando-se o método iterativo de Newton-Raphson, encontrou-se o valor do fator de forma (F) para um menor resíduo em cada material de milho, conforme equação (12):

$$F_k = F_{k-1} - \frac{g(F_{k-1})}{g'(F_{k-1})} \quad (12)$$

em que F_k é o fator de forma da curva de crescimento do sistema radicular da cultura de milho, estimado pelo método dos mínimos quadrados após k interações, F_{k-1} é o valor inicial de F atribuído ($0 < F_{k-1} < 1$) para iniciar o cálculo, $g(F_{k-1})$ corresponde à expressão dada pela equação (8), e $g'(F_{k-1})$ é a expressão da equação (11). As equações (8), (11), e (12) e os pares Dr_i e Ze_i foram utilizados para encontrar o valor de F para cada material estudado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de profundidade de raiz no campo são apresentados na Tabela 1. No final do ciclo da cultura, obteve-se a variação temporal do crescimento radicular expresso em dias após a semeadura (DAS), ou em razão de Graus-dia $\left(Dr_i = \frac{GD_i}{0,7 \cdot GD_T} \right)$ para os materiais de milho estudados.

Observaram-se pequenas diferenças em relação à profundidade atingida por cada uma das variedades. Porém, constatou-se que o milho apresenta um crescimento radicular da forma sigmoidal bem definida (Figura 1) o que permitiu a escolha da equação 4 para determinar o fator de forma da curva de crescimento (F).

Na Tabela 2, são apresentados os valores dos fatores de forma (F) da curva de crescimento radicular de cada material. Observam-se valores semelhantes do fator de forma (F) entre os três materiais.

TABELA 1 – Variação temporal da profundidade radicular (cm) em cada um dos materiais de milho utilizados no experimento no i -ésimo dia (Ze_i).

DDS	Dri	Materiais de Milho		
		CMS-54	CMS-36	POOL-18
5	0,05733	3	3	3
10	0,11772	8	8.5	10
15	0,17448	11	12	13.5
26	0,29485	16.5	18	18
36	0,41745	23	25	29
46	0,53504	35	45	46
54	0,63727	45	56	54
63	0,76812	60	65	70
76	0,91576	65	68	71
83	1,00000	68	70	71

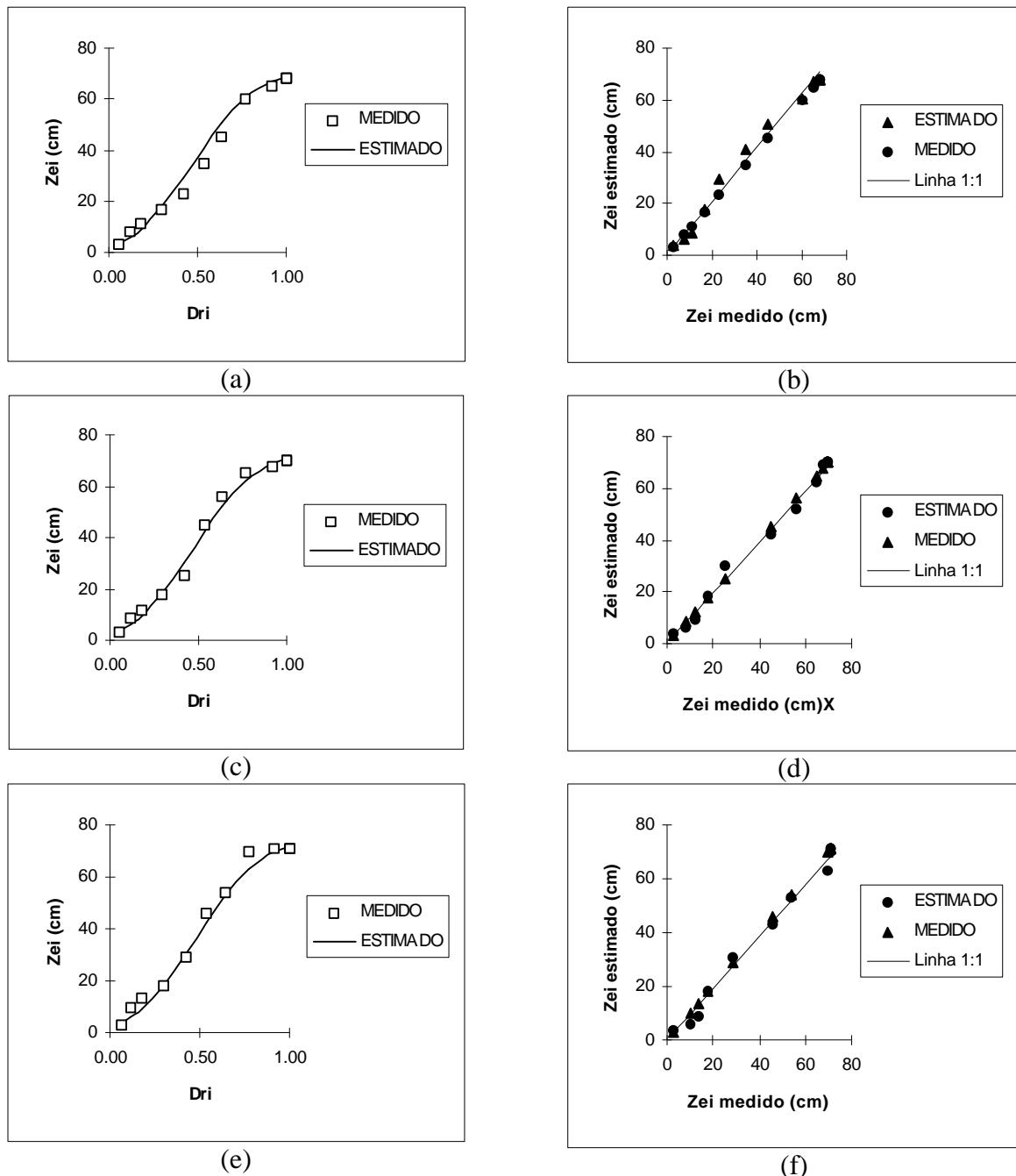


FIGURA 1 – Curvas de crescimento do sistema radicular da cultura de milho. (a, b) material CMS-54; (c,d) material CMS-36 e (e,f) material POOL-18. Variação da profundidade efetiva do sistema radicular (Ze , cm) em função do desenvolvimento relativo da cultura- Dr (a, c, e). Comparação da profundidade efetiva do sistema radicular entre os valores observados e os estimados (b, c, f).

TABELA 2 – Fator de forma da curva de crescimento do sistema radicular (F), ajustado para o modelo co-senoidal para um dos materiais estudados e estatísticas dos dados observados e estimados.

Cultivar	F	r^2	Erro Padrão	Teste F
CMS-54	0,942	0,984	3,17	576,69
CMS-36	0,944	0,989	2,73	832,95
POOL-18	0,946	0,989	2,76	838,57
MÉDIA	0,944			

Nível de significância: 1%

Pela Tabela 2, observa-se a boa aderência do modelo utilizado para expressar a relação funcional entre a soma calórica e a variação do sistema radicular. Os valores do coeficiente de determinação para cada material mostram a adequada correlação do modelo aos dados observados.

A curva de crescimento radicular dos três materiais de milho é específica para as condições em que foi realizado o experimento, a qual depende das interações entre o solo, a planta, o manejo da cultura e o clima, como tem sido citado por Subbaiah e Rao (1993) e Borg e Grimes (1968).

Dado que o fator de forma (F) estimado é semelhante nos diferentes materiais de milho aqui estudados, pode-se assumir o valor médio de F ($F = 0,944$) para expressar adequadamente a forma sigmoidal da curva de crescimento radicular da cultura de milho para as condições em que foi realizado o experimento.

CONCLUSÕES

a) O modelo co-senoidal pode ser utilizado para representar a variação temporal (em termos de desenvolvimento relativo) da profundidade efetiva do sistema radicular.

b) Os fatores de forma da curva de crescimento do sistema radicular foram similares para os três materiais de milho estudados. O valor médio de $F = 0,944$ pode ser utilizado para a cultura de milho, nas condições estudadas, com boa aproximação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENNET, O.; DOSS, B. Effect of soil moisture level on root distribution of cool-season forage species. **Agron. J.** Madison, v.52, n.4, p.204-7, 1960.
- BORG, H.; GRIMES, D.W. Depths development of roots with time: an empirical description, **Trans. ASAE**, St. Joseph, v.29, n.1, p.194-197, 1986.
- OURADO NETO, D.; JON van LIER, Q. **Programa para elaboração do Balanço hídrico para culturas anuais e perenes**. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Agricultura, 1991. 58p.
- DOURADO NETO, D.; PARLANGE, M. B.; NIELSEN, D. R **Mechanistic model to forecast yield for a nonphotosensitive annual crop**. Davis: University of California. Departament of Land, Air and Water Resources, 1995. 27p.
- DRIESEN, P.M. **A first introduction to quantifies land evaluation procedures**. Wageningen: Centre for World Food Studies, 1986. 186 p.
- GILMORE, E.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**. Madison, 50: 611-615, 1958.
- RASMUSSEN, V.P.; HANKS, R. J. Spring wheat yield model for limited moisture conditions, **Agron. J.**, Madison, v.70, p.940-944, 1978.

SCHOUWENAARS, J.M. Rainfall irrigation and sowing strategies in southern Mozambique, **Agric. Water Mgmt.**, 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**, New York, v.119, n.5, p.898-905, 1993.

VIDAL-TORRADO, P.; SPAROVEK, G. **Mapa pedológico detalhado 1:10000 do campus “Luiz de Queiroz”**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. (não publicado).

VILLA NOVA, N. A. **Dados meteorológicos do município de Piracicaba**. Piracicaba: ESALQ/USP. Departamento de Física e Meteorologia, 1989.