

ISSN 0104-1347

Modelos de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa-de-vegetação

Fitting growth models to hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown under greenhouse conditions

Gustavo Bastos Lyra¹, Sérgio Zolnier², Luiz Cláudio Costa³, Gilberto Chohaku Sedyama⁴ e Maria Aparecida Nogueira Sedyama⁵

Resumo - O estudo experimental foi conduzido em casa-de-vegetação com três cultivares de alface (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT). O objetivo foi avaliar o ajuste dos modelos exponencial, logístico e Gompertz ao acúmulo de matéria seca após o transplante. Os ajustes dos modelos de crescimento foram efetuados utilizando-se três variáveis independentes, denominadas “dias após o transplante” (DAT), “graus-dias” (GD) e “graus-dias efetivos” (GDE). Resultados da análise de regressão não-linear demonstraram que todos os modelos simularam de maneira exata o acúmulo de matéria seca após o transplante de todos os cultivares de alface em questão. Valores dos coeficientes de determinação ajustados estiveram acima de 0,9847 para todos os modelos avaliados. Entretanto, a taxa máxima de crescimento relativo, representada pelo parâmetro r , foi superestimada pelo modelo Gompertz para os três cultivares. Resultados desse parâmetro, estimados pelo referido modelo, foram, aproximadamente, 50% superiores aos valores experimentais medidos logo após o transplante. Em contraste, os modelos logístico e exponencial forneceram estimativas próximas dos valores observados. No que se refere a variável independente DAT, GD e GDE, os resultados de ajuste e de estimativa dos parâmetros de regressão foram bastante similares. Contudo, o empirismo associado à variável independente DAT limita a aplicação dos resultados somente para condições ambientais semelhantes às medidas no interior da casa-de-vegetação no período do experimento, o qual foi conduzido de 24/06 a 26/07/01 na localidade de Viçosa-MG.

Palavras-chave: cultivo protegido, horticultura, técnica de circulação laminar de nutrientes, análise de crescimento.

Abstrac - An experimental study was carried out in a greenhouse with three cultivars of lettuce (Grand Rapids, Regina and Great Lakes), which were grown in a hydroponic system with a nutrient film technique, well-known as a NFT system. The objective was to evaluate the goodness of fit of the exponential, logistic and Gompertz growth models after transplanting. The models were fitted using three independent variables denoted by “days after transplanting” (DAT), “degrees-day” (DD) and “effective degrees-day” (EDD). Results of the nonlinear regression analysis demonstrated that all models were capable of simulating the accumulated dry matter after transplanting for all cultivars. Values of the adjusted regression coefficient were above 0.9847 for all growth models. However, the maximum relative growth rate, represented by the parameter r , was overestimated by the Gompertz model for all cultivars. Values of this parameter estimated by the Gompertz model were approximately 50% above experimental values measured after transplanting. In contrast, logistic and exponential models provided estimates close to observed values. With regard to the independent variables DAT, DD and EDD, results of the goodness of fit and estimates of parameters from regression analysis were similar. However, the empirical procedure associated with the independent variable DAT limits the application of the models to only similar environment conditions measured in the greenhouse during the experiment, which was conducted in Viçosa-MG, from 24 June to 26 July 2001.

Keywords: protected cultivation, horticulture, nutrient film technique, growth analysis.

¹ Meteorologista, Doutorando em Física do Ambiente Agícola ESALQ/USP – AV. Pádua Dias, 11 Dep. de Ciências Exatas – Cx. 09 CEP:13418-900 - gblyra@esalq.usp.br

² Professor Adjunto, Ph.D. – DEA/UFV – E-mail: zolnier@ufv.br

³ Professor Adjunto, Ph.D. – DEA/UFV – E-mail: lcosta@ufv.br

⁴ Professor Titular, Ph.D. – DEA/UFV – E-mail: sedyama@ufv.br

⁵ Pesquisadora D.S. – EPAMIG, CTZM. E-mail: marians@ufv.br

Introdução

Atualmente, a alface é a principal cultura produzida em sistemas hidropônicos no Brasil, principalmente no sistema de circulação laminar de nutrientes, conhecido e consagrado internacionalmente como NFT. De acordo com FAQUIN & FURLANI (1999), a cultura da alface é de fácil manejo e ciclo rápido. Para otimização do cultivo dessa hortaliça em sistemas hidropônicos, deve-se controlar a frequência de aplicação de água, a condutividade elétrica (CE) e o pH da solução nutritiva (JENSEN & COLLINS, 1985). Assim, em casas-de-vegetação não-climatizadas, a produtividade se torna dependente apenas das condições ambientais como temperatura e umidade relativa do ar, radiação fotossinteticamente ativa, velocidade do ar e duração do período diurno.

O crescimento e desenvolvimento da alface em sistemas hidropônicos, além de ser afetado pelas condições meteorológicas do ambiente de cultivo, sofrem a ação de fatores como partição de matéria seca, estrutura do dossel e diferenças entre genótipo e práticas agrícolas (HAY & WALKER, 1989). Por isso, é necessário o ajuste de modelos de crescimento que permitam estimar a resposta das culturas ao ambiente e às interações com práticas culturais e sistemas de produção vegetal, como o sistema NFT (TEI *et al.*, 1996a).

Vários tipos de modelos (empíricos, semi-empíricos ou mecanísticos) podem ser usados, de acordo com suas habilidades, para facilitar a interpretação dos processos envolvidos no sistema de produção vegetal (JONES, 1992). Embora modelos mecanísticos tenham uma formulação científica (PENNING de VRIES & VAN LAAR, 1982), modelos semi-empíricos simples podem fornecer também informações e estimativas úteis, particularmente se forem baseados em parâmetros que permitem interpretação biológica (RICHARDS, 1959). Os modelos empíricos usados frequentemente para estimar o crescimento de plantas incluem a função logística (PEARL & REED, 1920) e as funções Gompertz e Richards (AMER & WILLIAMS, 1957; RICHARDS, 1959).

Os modelos semi-empíricos incluem a função expolinear de GOUDRIAAN & MONTEITH (1990), para o crescimento de plantas em um dossel uniforme. Esse modelo é baseado na pressuposição de que a taxa de crescimento de qualquer cultura é proporcional à radiação interceptada, sendo exponencial quando as plantas estão isoladas, sem sombreamento mútuo,

e linear após o fechamento do dossel, quando a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa é máxima (COSTA *et al.*, 1999).

A variável independente tempo decorrido (tempo após a emergência ou tempo após o transplântio) é comumente usada em modelos de crescimento. Todavia, as taxas dos processos metabólicos dependem da temperatura. Normalmente, assume-se que essa dependência é aproximadamente linear, sendo que o tempo térmico acumulado, expresso em graus-dias (GD), é usado como uma alternativa ao tempo decorrido após a emergência (TEI *et al.*, 1996b). Por outro lado, o crescimento das plantas depende também dos níveis de radiação fotossinteticamente ativa. SCAIFE *et al.* (1987) propuseram o tempo fototérmico, conhecido como graus-dias efetivos (GDE), para quantificar os efeitos combinados da temperatura do ar e da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) no crescimento de plantas.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o ajuste dos modelos expolinear, logístico e Gompertz ao acúmulo de matéria seca após o transplântio, para três cultivares de alface (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), cultivadas em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT), em condições de casa-de-vegetação, utilizando-se três variáveis independentes, denominadas “dias após o transplântio” (DAT), “graus-dias” (GD) e “graus-dias efetivos” (GDE).

Material e métodos

O experimento foi conduzido no período de 24/06 a 26/07/01, em casa-de-vegetação não-climatizada, com estrutura metálica em forma de arco, coberta com 150 μ m de polietileno de baixa densidade (PBDE), com maior comprimento orientado no sentido Leste-Oeste. A casa-de-vegetação foi construída na área experimental da Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwa (clima temperado quente – mesotérmico; chuvas no verão e seca no inverno; temperatura média do mês mais quente superior a 22°C). As coordenadas geográficas são: latitude 20°45'45''S, longitude 42°52'04''W e altitude de 690 m.

Foram utilizados três cultivares de alface, sendo dois do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes)

e um do tipo lisa (Regina). As sementes foram colocadas para germinar em células de espuma fenólica com formato cúbico, tendo 0,02 m de aresta. Após a sementeira, as células foram mantidas em um sistema hidropônico construído para produção de mudas, com área de aproximadamente 2 m², o qual foi colocado sobre uma bancada na casa-de-vegetação. No período da sementeira até a germinação, a aplicação de água foi realizada durante dez minutos com intervalos de uma hora. Após a germinação, as plantas passaram a receber solução nutritiva, preparada de acordo com a formulação proposta por FURLANI (1998) para hortaliças de folhas. Apesar da substituição da água pela solução nutritiva, a frequência de aplicação não foi alterada. Na fase de produção das mudas, a condutividade elétrica foi mantida em torno de 0,8 dS m⁻¹.

Aos 21 dias após a sementeira (21/06/01), as mudas, com três a quatro folhas definitivas, foram transplantadas para as bancadas de cultivo, permanecendo nesse local até o final do experimento (26/07/01). As bancadas foram compostas de cinco perfis hidropônicos com 6,0 m de comprimento e com orifícios de 0,05 m de diâmetro, onde foram colocadas as mudas dos cultivares em estudo, adotando-se o espaçamento de 0,25 m entre plantas e linhas. Para realização do experimento, foram utilizadas oito bancadas de crescimento, sendo duas para cada cultivar e, adicionalmente, outras duas para reposição das plantas utilizadas nas análises de crescimento. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com três tratamentos (cultivares de alface) e duas repetições (bancadas de crescimento).

As plantas foram irrigadas com a mesma solução nutritiva usada para a produção das mudas, mantendo-se o pH em 6,0 durante todo o ciclo da cultura. Entretanto, a CE foi mantida em torno de 1,3 dS m⁻¹, valor abaixo do recomendado por FURLANI (1998) de 1,8 dS m⁻¹. Esse procedimento foi realizado para se amenizar a queima de bordos, problema comum no cultivo hidropônico, conhecido também como "tipburn". Nesse estudo, a solução circulava intermitentemente das 05 às 19 h nas bancadas de crescimento, sendo que a aplicação da solução nutritiva foi realizada durante dez minutos, com intervalos de 20 minutos para drenagem e oxigenação das raízes. Adicionalmente, uma aplicação foi realizada às 24 h para se evitar um possível estresse hídrico das plantas devido à transpiração noturna. Os intervalos de aplicação da solução nutritiva foram controlados por meio da utilização de um temporizador.

Após o transplantio das mudas nas bancadas de crescimento, foram feitas sete avaliações de matéria seca, com intervalos de cinco dias. A primeira amostragem foi realizada a partir do quarto dia após o transplante das mudas (25/06/01), correspondendo à terceira semana após a sementeira. Em cada amostragem, foram colhidas cinco plantas em cada bancada de crescimento. As plantas retiradas para análise foram imediatamente substituídas por plantas de mesma variedade que estavam sendo cultivadas nas bancadas de reposição.

As amostras foram levadas para uma estufa com circulação de ar onde permaneceram por 72 horas a temperatura de 70°C, sendo depois pesadas em balança de precisão (Modelo MICRONAL B200, Micronal S.A., São Paulo, SP) com $\pm 0,001$ g, para quantificação da matéria seca da parte aérea.

Os graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE) foram determinados pelas equações propostas por SCAIFE et al. (1987) e TEI et al. (1996a), respectivamente,

$$GD = \bar{T} - T_b \quad (1)$$

e

$$GDE^{-1} = GD^{-1} + fRFA^{-1} \quad (2)$$

em que \bar{T} é a temperatura do ar média diária (°C); T_b é a temperatura base da cultura (°C), RFA é a integral da radiação fotossinteticamente ativa (MJ m⁻²); e f é a constante que define a importância relativa da RFA e da temperatura do ar (GD m² MJ⁻¹). Para o cálculo do GD e GDE para a cultura da alface, os mesmos autores determinaram valores de 3,5 °C e 0,09 GD m² MJ⁻¹ para as variáveis, T_b e f , respectivamente. Diversos valores de temperatura base para a cultura da alface têm sido recomendados na literatura. BRUNINI et al. (1976) citam 6 °C para o cultivar "White Boston", compreendendo o sub-período emergência-transplante. AIKAMAN & SCAIFE encontraram 2,2 °C para o cultivar "Pennlake", em condições de casa-de-vegetação, sendo que o plantio foi realizado diretamente no solo. Os autores utilizaram metodologia similar a proposta por SCAIFE et al. (1987).

Os dados de temperatura do ar e da RFA foram obtidos por meio de um sistema automático de aquisição de dados, tendo como plataforma um microcomputador. Nessa configuração, uma placa de aquisição de dados (CYDAS 1602HR, CYBERRESEARCH, Branford, CT), consistindo de 16 canais de entrada analógica com 16 bits, foi insta-

lada em um barramento ISA do microcomputador. Dois canais analógicos foram conectados ao sensor de temperatura (Modelo, HUM50Y, VAISALA, Woburn, MA) e ao sensor de radiação fotossinteticamente ativa (Modelo LI-190SA-50, LICOR Inc., Lincoln, NE). Os dados ambientais medidos foram armazenados em intervalos de um minuto, totalizando 1440 medições por dia. Cada dado armazenado correspondeu a uma média de cinco valores medidos com intervalos de um segundo. A temperatura média diária do ar foi calculada como sendo a média aritmética de todas as leituras, incluindo as medições dos períodos diurno e noturno.

Os modelos utilizados foram o expolinar, logístico e Gompertz, os quais foram ajustados de acordo com a variável independente, podendo ser “dias após o transplântio” (DAT), “graus-dias” (GD) ou “graus-dias efetivos” (GDE). As análises de regressão foram realizadas com base na aplicação dos logaritmos aos modelos propostos, conforme sugerido por TEI et al. (1996a),

expolinar:

$$\ln(w) = \ln(c_m / r) + \ln\{\ln[1 + \exp(r(x - t_b))]\} \quad (3)$$

logístico:

$$\ln(w) = \ln(w_f) - \ln[1 + (w_f / w_o - 1) \exp(-rx)] \quad (4)$$

Gompertz:

$$\ln(w) = \ln(w_o) + r[1 - \exp(-r_d x)] / r_d \quad (5)$$

em que x representa dias (DAT), graus-dias acumulados (Σ GD) ou graus-dias efetivos acumulados (Σ GDE) após o transplântio; w_o e w_f correspondem, **respectivamente, a matéria seca da planta ($g\ m^2$)** no início e final do ciclo da cultura, excluindo-se a matéria seca das raízes; r é a taxa máxima de crescimento relativo ($g\ g^{-1}\ d^{-1}$); c_m é a taxa máxima de crescimento absoluto ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$); r_d é o parâmetro que define o decréscimo da taxa de crescimento relativo; e t_b é o tempo necessário para o fechamento do dossel (DAT, GD ou GDE).

Para propósitos de avaliação dos modelos de crescimento, valores medidos da taxa máxima de crescimento relativo (r), obtidos imediatamente após o transplante das mudas, foram determinados pela equação apresentada por BENINCASA (1988),

$$r = \frac{\ln(w_2) - \ln(w_1)}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

em que w_1 e w_2 são a matéria seca medida (g) aos quatro e nove dias após o transplântio, respectivamente, e $t_2 - t_1$ é o intervalo de tempo entre as duas amostragens, sendo cinco dias nesse caso.

Resultados e discussões

Todos os modelos estudados apresentaram coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajs}) bastante elevado, da ordem de 0,99, para os três cultivares de alface e para as três variáveis independentes, DAT, GD e GDE (Figuras 1, 2 e 3). Entretanto, deve-se salientar que o R^2_{ajs} fornece apenas uma idéia relativa do ajuste de uma regressão não-linear. Os modelos expolinar e logístico, quando utilizaram as variáveis independentes GD e GDE apresentaram coeficientes de determinação ligeiramente superiores aos encontrados com a utilização de DAT para todos os cultivares. Da mesma forma, esses modelos conseguem descrever melhor a dependência dos processos metabólicos das plantas com relação à temperatura do ar e à radiação fotossinteticamente ativa. Em contraste aos modelos expolinar e logístico, os coeficientes de determinação para o modelo Gompertz, tendo DAT como variável independente, foram superiores quando comparados com aqueles que tinham GD ou GDE.

Com exceção do R^2_{ajs} para o cultivar Regina, tendo como variável independente GDE, os valores dos coeficientes de determinação para o modelo expolinar foram ligeiramente superiores aos encontrados por TEI et al. (1996a). No presente estudo, o menor valor de R^2_{ajs} foi de 0,9928 para o cultivar Regina, tendo como variável independente GDE, e o maior valor foi 0,9985 para o cultivar Grand Rapids, tendo como variável independente GD. Resultados do trabalho TEI et al. (1996a), para alface tipo crespa (cv. Saladin R100), foram 0,996, 0,993 e 0,994, tendo como variáveis independentes dias após o transplântio, graus-dias e graus-dias efetivos, respectivamente.

ISHAG & DENNETT (1998), avaliando o ajuste do modelo expolinar para plantas de ervilha, lentilha e fava, cultivadas em campo, sob diferentes densidades de plantio, com a utilização de dias após a emergência (DAE) como variável independente, encontraram coeficientes de determinação médio de

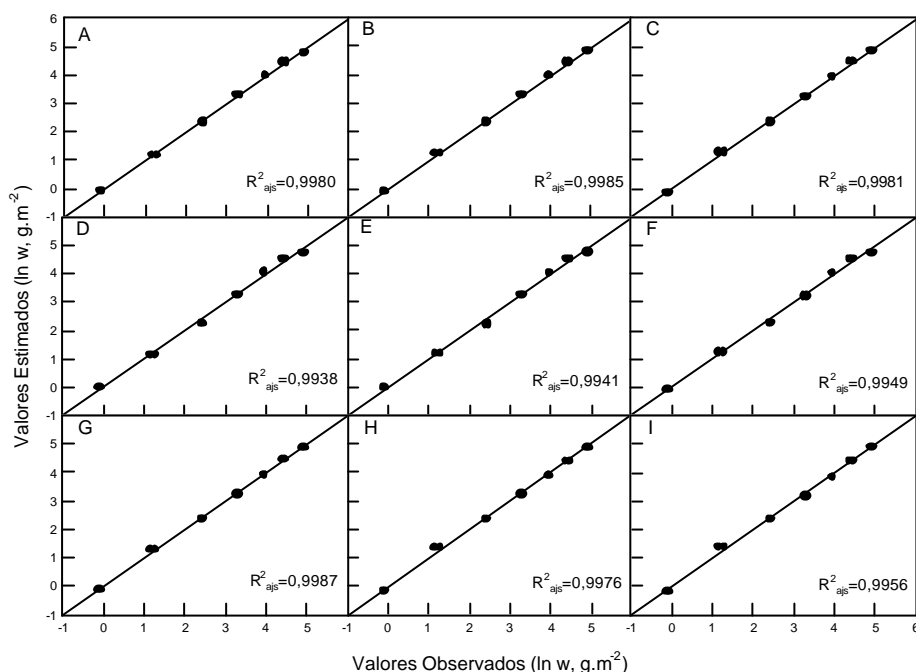


Figura 1. Valores de matéria seca acumulada (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Grand Rapids. Viçosa-MG, 2001.

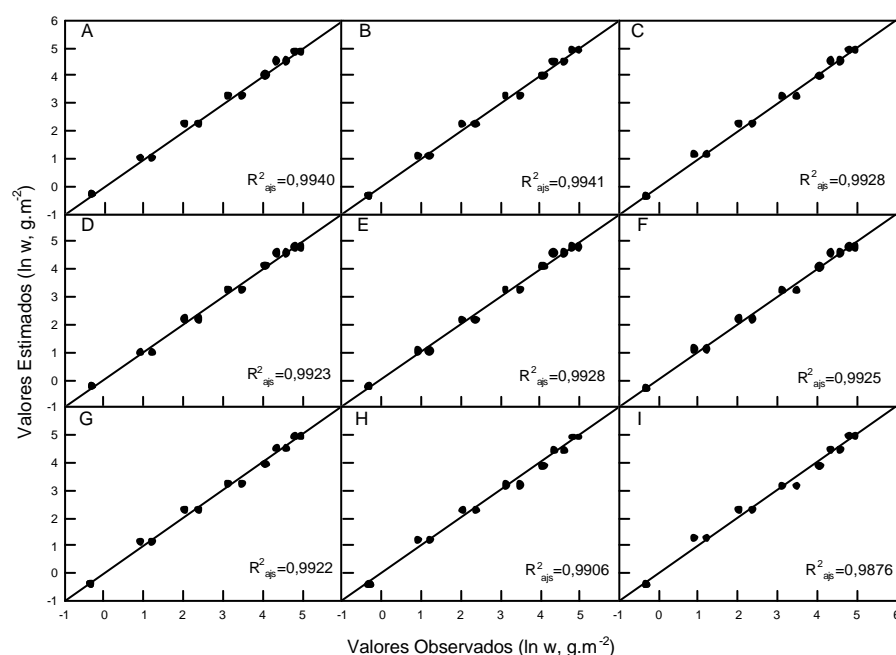


Figura 2 Valores de matéria seca acumulada (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Regina. Viçosa-MG, 2001.

0,997. COSTA et al. (1999) encontraram valores do coeficiente de determinação variando entre 0,97 a 0,99 para ajuste do modelo expolinear para a cultura da soja, sob condições de estresse hídrico, adotando-se DAE como variável independente.

Com relação ao modelo logístico, os valores de R^2_{aj} para o cultivar Grand Rapids estiveram bem próximos do valor obtido por TEI et al. (1996b), que encontraram 0,994 em condições de campo. Para o cultivar Grand Rapids, os valores obtidos foram 0,9938, 0,9941 e 0,9949, tendo como variáveis independentes DAT, GD e GDE, respectivamente. Em geral, valores ligeiramente menores, oscilando de 0,9923 a 0,9940, foram encontrados para os cultivares Regina e Great Lakes.

Coefficientes de determinação para modelo Gompertz (Figuras 1, 2 e 3) foram inferiores aos encontrados por TEI et al. (1996a), para todos os cultivares, utilizando-se GDE como variável independente, e valores superiores para os cultivares Grand Rapids e Great Lakes, tendo como variável independente DAT. Comparando-se os três cultivares, também se pode observar que para o modelo mencionado, a variável GDE forneceu os menores valores de R^2_{aj} para todos os cultivares.

O modelo expolinear foi o que apresentou maiores R^2_{aj} com relação aos outros modelos para graus-dias acumulados e graus-dias efetivos, sendo o de Gompertz superior aos demais para os cultivares Grand Rapids

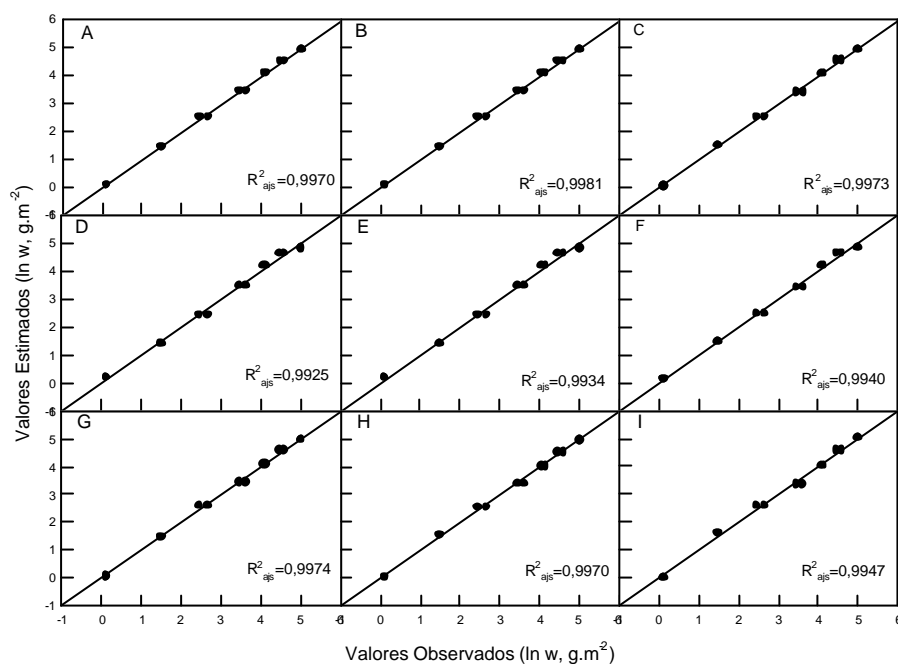


Figura 3 Valores de matéria seca acumulada (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Great Lakes. Viçosa-MG, 2001.

e Great Lakes, utilizando-se a variável DAT. Com exceção do cultivar Regina, tendo DAT como variável independente, o modelo logístico apresentou menores R^2_{aj} com relação aos outros modelos para todos os cultivares e variáveis independentes. TEI et al. (1996a) também observaram um ajuste inferior do modelo logístico, independente da utilização de dias após o transplântio, graus-dias ou graus-dias efetivo, em relação aos outros modelos.

Os resultados obtidos precisam ser interpretados com cautela. Todos os modelos apresentaram coeficientes de regressão elevados para todas as variáveis independentes. No entanto, os parâmetros obtidos por meio da análise de regressão precisam ser comparados em estudos posteriores para condições meteorológicas diferentes das observadas durante o período de realização do experimento. Assim, espera-se que os valores estimados do acúmulo de matéria seca se aproximem mais dos valores observados quando as variáveis independentes GD e GDE são utilizadas. Deve-se notar que os parâmetros dos modelos expolinear, logístico e Gompertz, tendo como variável independente DAT, foram ajustados para as condições ambientais medidas na casa-de-vegetação

para o período que compreende o final da estação do outono e o início do inverno. Portanto, se os parâmetros obtidos nesse estudo forem utilizados para estimativa do crescimento dos três cultivares de alface em outras regiões e estações do ano, os valores estimados, tendo DAT como variável independente, não devem ser coerentes com os valores experimentais medidos. Por outro lado, os modelos que empregam GD e GDE tendem a fornecer resultados mais condizentes com a realidade, uma vez que essas variáveis representam alterações das condições do ambiente de crescimento das plantas. De modo geral, observa-se que os três modelos descrevem bem o acúmulo de matéria seca e, portanto, não subestimam e nem superestimam os valores medidos desde o transplântio até a colheita.

As Tabelas 1, 2 e 3 mostram que os valores da taxa máxima de crescimento relativo (r), estimados pelos modelos expolinear e logístico, tendo DAT como variável independente, ficaram próximos dos valores experimentais observados para os três cultivares de alface. Por outro lado, o modelo de Gompertz superestimou em aproximadamente 50% a taxa máxima de crescimento relativo com a mesma variável independente. Resultado semelhante foi relatado por TEI et al. (1996a), o qual observou que o modelo Gompertz superestimou os valores observados em cerca de 40%. Do ponto de vista biológico, esses resultados sugerem que valores do parâmetro r estimados pelo modelo Gompertz deveriam ser interpretados com cautela. A análise das Figuras 1, 2 e 3, letras G, H e I, indica que os dados de matéria seca acumulada para nove dias após o transplântio foram ligeiramente superestimados pelo modelo Gompertz, afetando seriamente a estimativa do parâmetro r pela análise de regressão. Apesar do bom ajuste do modelo aos valores observados de matéria seca acumulada, conforme mostrado pelos altos valores de R^2_{aj} , a interpretação da taxa de crescimento logo após o

Tabela 1. Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para alface, cultivar Grand Rapids, tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (DAT), graus-dia (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2001.

Modelo	Parâmetro	DAT	GD	GDE
Expolinear	r	0,2606 ($\pm 0,0081$)	0,0231 ($\pm 0,0006$)	0,0282 ($\pm 0,0008$)
	c_m	7,171 ($\pm 0,504$)	0,5787 ($\pm 0,0327$)	0,7550 ($\pm 0,0494$)
	t_h	16,92 ($\pm 2,64$)	205,4 ($\pm 6,0$)	171,7 ($\pm 5,5$)
Logístico	r	0,2321 ($\pm 0,0091$)	0,0203 ($\pm 0,0008$)	0,0254 ($\pm 0,0009$)
	w_f	130,3 ($\pm 13,4$)	126,5 ($\pm 11,7$)	127,0 ($\pm 10,9$)
Gompertz	r	0,3841 ($\pm 0,0151$)	0,0373 ($\pm 0,0021$)	0,0449 ($\pm 0,0034$)
	r_a	0,0484 ($\pm 0,0025$)	0,0045 ($\pm 0,0003$)	0,0053 ($\pm 0,0005$)
Observado	r	0,2618 ($\pm 0,0079$)	0,0215 ($\pm 0,0007$)	0,0247 ($\pm 0,0008$)

transplântio fica comprometida. Por outro lado, os modelos expolinear e logístico tiveram também altos valores de R^2_{aj} , mas com a possibilidade de interpretação biológica do parâmetro r .

Os valores do parâmetro r estimados pelo modelo logístico, com GD e GDE (Tabelas 1, 2 e 3), foram os que mais se aproximaram dos valores observados para os três cultivares de alface. Por outro lado, como ocorreu com a variável independente DAT, o modelo de Gompertz superestimou bastante o valor da taxa de crescimento relativo logo após o transplântio. A mesma tendência de superestimar os valores experimentais de r também pode ser observada para o modelo expolinear. Entretanto, os valores estimados de r ficaram apenas ligeiramente acima dos valores medidos.

ISHAG & DENNETT (1998) encontraram valores observados de r variando entre 0,24 e 0,35 $g\ g^{-1}\ d^{-1}$, enquanto os valores estimados pelo modelo expolinear variaram de 0,16 a 0,20 $g\ g^{-1}\ d^{-1}$. COSTA et al. (1999), utilizando o mesmo modelo, relataram que os valores estimados de r variaram entre 0,12 e 0,20 $g\ g^{-1}\ d^{-1}$ para a cultura da soja. GOUDRIAAN & MONTEITH (1990) encontraram respectivamente para sorgo e *faba bean* valores medidos variando entre 0,242 a 0,216 $g\ g^{-1}\ d^{-1}$ e 0,127 a 0,128 $g\ g^{-1}\ d^{-1}$.

Os valores de r observados no presente trabalho foram superiores para DAT e inferiores para GD e GDE quando comparados com os reportados por TEI et al. (1996a) para a cultura da alface cultivada em condições de campo. Os valores encontrados pelos mesmos autores foram 0,2190 $g\ g^{-1}\ d^{-1}$, 0,0277 $g\ g^{-1}\ GD^{-1}$ e 0,0310 $g\ g^{-1}$

Tabela 2. Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para alface, cultivar Regina, tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (DAT), graus-dia (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2001.

Modelo	Parâmetro	DAT	GD	GDE
Expolinear	r	0,2718 ($\pm 0,0144$)	0,0241 ($\pm 0,0013$)	0,0295 ($\pm 0,0016$)
	c_m	7,840 ($\pm 1,005$)	0,6310 ($\pm 0,0749$)	0,8184 ($\pm 0,1084$)
	t_h	17,43 ($\pm 1,11$)	211,5 ($\pm 11,9$)	175,8 ($\pm 10,5$)
Logístico	r	0,2914 ($\pm 0,0383$)	0,0218 ($\pm 0,0009$)	0,0272 ($\pm 0,0011$)
	w_f	129,9 ($\pm 14,7$)	126,6 ($\pm 13,0$)	127,2 ($\pm 13,2$)
Gompertz	r	0,4122 ($\pm 0,0399$)	0,0402 ($\pm 0,0045$)	0,0484 ($\pm 0,0061$)
	r_a	0,0492 ($\pm 0,0061$)	0,0046 ($\pm 0,0006$)	0,0054 ($\pm 0,0008$)
Observado	r	0,2756 ($\pm 0,0299$)	0,0226 ($\pm 0,0024$)	0,0261 ($\pm 0,0028$)

Tabela 3. Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para alface, cultivar Great Lakes, tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (DAT), graus-dia (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado em parênteses. Viçosa-MG, 2001.

Modelo	Parâmetro	DAT	GD	GDE
Expolinear	r	0,2654 (± 0,0106)	0,0235 (± 0,0008)	0,0286 (± 0,0010)
	c _m	7,472 (± 0,606)	0,6088 (± 0,0373)	0,7934 (± 0,0588)
	t _h	15,97 (± 0,76)	195,3 (± 6,6)	163,7 (± 6,4)
Logístico	r	0,2339 (± 0,0102)	0,0205 (± 0,0008)	0,0256 (± 0,0010)
	w _r	138,0 (± 14,4)	134,8 (± 12,3)	135,6 (± 11,8)
Gompertz	r	0,3956 (± 0,0217)	0,0385 (± 0,0024)	0,0463 (± 0,0038)
	r _a	0,0520 (± 0,0035)	0,0048 (± 0,0003)	0,0056 (± 0,0005)
Observado	r	0,2754 (± 0,0028)	0,0226 (± 0,0002)	0,0260 (± 0,0023)

GDE⁻¹, os quais estão próximos dos valores apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Por outro lado, os valores de r estimados pelo modelo logístico são inferiores aos encontrados por SCAIFE et al. (1987) e BREWSTER & SUTHERLAND (1993), os quais foram 0,0239 e 0,0265 g g⁻¹ GD⁻¹, respectivamente.

Conclusões

- 1) Os modelos simularam de maneira exata o acúmulo de matéria seca após o transplântio de todos as cultivares de alface em questão. Valores dos coeficientes de determinação ajustados estiveram acima de 0,9847 para todos os modelos avaliados, mostrando que, de forma geral, seus parâmetros têm expressão biológica e não puramente estatística.
- 2) O parâmetro r que representa a taxa de crescimento relativo máximo foi excessivamente superestimado pelo modelo de Gompertz para os três cultivares de alface. Esse modelo, tendo DAT como variável independente, superestimou em aproximadamente 50% o parâmetro r logo após o transplântio das mudas. Em contraste, os modelos logístico e expolinear forneceram estimativas próximas dos valores observados.
- 3) Os resultados de estimativa do acúmulo de matéria seca após o transplântio, pelos modelos avaliados, utilizando-se as variáveis independentes DAT, GD e GDE, foram bastante similares. Entretanto, o empirismo associado à variável independente DAT limita a aplicação dos três modelos para condições

ambientais idênticas às medidas no presente trabalho.

Referências bibliográficas

- AIKAMAN, D.P.; SCAIFE, A. Modelling plant growth under varying environmental conditions in a uniform canopy. *Annals of Botany*, London, v. 72, n. 5, p. 485-492, 1993.
- AMER, F.A.; WILLIAMS, W.T. Leaf-area growth in *Pelargonium zonale*. *Annals of Botany*, London, v. 21, n. 83, p. 339-342, 1957.
- BENINCASA, M.M.P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 44 p.
- BREWSTER, J.L.; SUTHERLAND, R.A. The rapid determination in controlled environments of parameters for predicting seedling growth rates in natural conditions. *Annals of Applied Biology*, Wellesbourne, Warwick, UK, v. 122, n. 1, p. 123-133, 1993.
- BRUNINI, O. et al. Temperatura base para a alface (*Lactuca sativa* L.) cultivar "White Boston", em um sistema de unidade térmica. *Revista de Olericultura*, Lavras, v. 16, p. 28-29, 1976.
- COSTA, L.C. et al. Uso da função expolinear para análise de crescimento da cultura da soja em diferentes condições de disponibilidade de água no solo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 1-4, 1999.
- FAQUIN, V.; FURLANI, P.R. Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 99-104, 1999.

- FURLANI, P.R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia - NFT**. Campinas: IAC, 1998. 30 p. (Boletim Técnico, 168).
- GOUDRIAAN, J.; MONTEITH, J.L. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. **Annals of Botany**, London, v. 66, n. 6, p. 695-701, 1990.
- HAY, R.K.M.; WALKER, A.J. **An introduction to the physiology of crop yield**. Harlow (UK): Longman Scientific & Technical, 1989. 292 p.
- ISHAG, K.H.M.; DENNETT, M.D. Use of the exponential growth model to analyse the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: fitting the model. **Annals of Botany**, London, v. 82, n. 4, p. 497-505, 1998.
- JENSEN, M.H.; COLLINS, W.L. Hydroponic vegetable production. **Horticultural Reviews**, Westport, v. 7, p. 484-555, 1985.
- JONES, H.G. **A quantitative approach to plant-environment interactions. In: Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University, 1992, p. 1-8.
- PENNING de VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: PUDOC, 1982. 308 p.
- PEARL, R.; REED, L.J. Skew growth curves. **Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States**. v. 6, p.16-22, 1920.
- RICHARDS, F.J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, v. 10, London, n. 29, p. 290-300, 1959.
- SCAIFE, A.; COX, E.F.; MORRIS, G.E.L. The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetable species. **Annals of Botany**, London, v. 59, n. 3, p. 325-334, 1987.
- TEI, F.; AIKMAN, D.P.; SCAIFE, A. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth Modeling. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 5, p. 645-652, 1996 a.
- TEI, F.; SCAIFE, A.; AIKMAN, D.P. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 5, p. 633-643, 1996 b.