

Modelos de crescimento para o feijão-caupi e o milho, sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado, no Semiárido brasileiro

Fitting growth models for cowpea and maize as sole crop and intercropp in the Brazilian semi arid

Magna Soelma Beserra de Moura¹, Luciana Sandra Bastos de Souza², Thieres George Freire da Silva³, José Monteiro Soares⁴, José Francisco Alves do Carmo⁵, Elieth Oliveira Brandão⁶

Resumo: O objetivo desse trabalho foi analisar o desempenho dos modelos de crescimento expolinear, logístico e de Gompertz quanto ao acúmulo de fitomassa seca das culturas do feijão-caupi e do milho submetidas a dois sistemas de plantio - exclusivo e consorciado -, no Semiárido brasileiro. Foram utilizados os dados de dois experimentos independentes, conduzidos na mesma época de plantio, visando calibrar e avaliar os resultados dos modelos utilizando índices estatísticos de precisão (coeficiente de correlação - r) e de exatidão (índice de concordância - d) e os erros de estimativa (erro médio - MBE e raiz quadrada do erro médio - RMSE). Consideraram-se como as variáveis independentes o número de dias após a semeadura (DAS) e os graus-dia acumulados (GDA). Todos os modelos analisados apresentaram bom desempenho estatístico, com valores de r e d superiores a 0,97 e 0,99 e valores de MBE e RMSE máximos de 1,6040 g m⁻² e 1,1102 g m⁻², respectivamente. Os valores de DAS proporcionaram maior desempenho aos modelos avaliados, porém a sua aplicabilidade limita-se ao local experimental. Os parâmetros biológicos gerados pelo modelo expolinear sugerem que o feijão-caupi e o milho, em sistema de plantio exclusivo, tiveram desenvolvimento morfofisiológico superior, quando comparado ao seu plantio em sistema consorciado.

Palavras-chave: matéria seca, graus-dia, modelagem, desenvolvimento regional.

Abstract: The aim of this work was to evaluate three growth models performance, expolinear, logistic and Gompertz, for accumulated dry matter of cowpea and maize under single and intercropp planting systems in the Brazilian semi-arid. The data used were obtained from two independent field experiments carried out in the same season, with the purpose of calibrating and evaluating these growth models. Statistical (correlation coefficient - r) accuracy indexes (index of agreement - d) and estimative errors (mean error - MBE and square root of mean error - RMSE) were used to analyze the results. The models were fitted using two independent variables: "days after sowing" (DAS) and "accumulated degrees-day" (GDA). The results demonstrated that all models presented good statistical adjustment, r and d values were higher than 0.97 and 0.99 and the maximum values of MBE and RMSE were 1.6040 g m⁻² and 1.1102 g m⁻², respectively. The independent variable DAS presented the best fit for all growth models studied. However only, the independent variable DAS limits the application of the models to similar environment conditions observed during the experiment. The biological parameters generated by the expolinear model showed that single cowpea and maize presented morphophysiological development superior to that the cowpea and maize intercropped.

Key-words: dry matter, degree-days, modeling, regional development.

¹Eng. Agrônoma, Pesquisadora, Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Fone: (87) 3862-1711, magna@cpatsa.embrapa.br

²Bióloga, Doutoranda, Universidade Federal de Viçosa (UFV), sanddrabastos@yahoo.com

³Eng. Agrônomo, Professor, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UAST), thieres@uast.ufrpe.uast.br

⁴Pesquisador aposentado, Embrapa Semiárido, Doutor em Recursos Naturais, monteiro@cpatsa.embrapa.br

⁵Biólogo, Bolsista da FACEPE/Embrapa Semiárido, jose.alves@cpatsa.embrapa.br

⁶Bióloga, eliethbrandao@yahoo.com.br

Introdução

A produção de milho e feijão para a alimentação humana constitui uma atividade básica e generalizada na grande maioria das pequenas propriedades rurais do Nordeste brasileiro, destacando-se pela sua importância socioeconômica. Nesse contexto, a prática do consórcio de culturas é generalizada entre os pequenos produtores, sendo a associação de milho e feijão a mais comum. Dentre as vantagens do cultivo consorciado em relação ao plantio exclusivo (monocultivo), destaca-se a possibilidade de produção diversificada de alimentos em uma mesma área, propiciando melhor distribuição de renda, proteção do solo, maior regularidade de suprimentos alimentícios e melhor aproveitamento de mão-de-obra (BEZERRA NETO et al., 2001). Além disso, o consórcio reduz os riscos de perda de produção devido às irregularidades climáticas, pois, caso uma das culturas tenha sua produtividade reduzida, os rendimentos da outra podem compensar as perdas de safra (HEREDIA ZARATE et al., 2003).

O crescimento e o desenvolvimento das culturas sob condições ótimas de água e nutrientes são influenciados por fatores ambientais (temperatura, radiação e fotoperíodo), hábito de crescimento das plantas, partição de matéria seca, estrutura do dossel e, conseqüentemente, pelas interações entre o genótipo e práticas de manejo, por exemplo, o cultivo em diferentes sistemas de produção. Sob essas condições, é possível avaliar e comparar a resposta de modelos de simulação de crescimento (TEI et al., 1996). Alguns desses modelos incorporam parâmetros fisiológicos utilizados em análise de crescimento (Benicasa, 1988; Urchei et al., 2000), como a função expolinear proposta por GOUDRIAAN & MONTEITH (1990). O modelo expolinear considera parâmetros biológicos como taxa de crescimento absoluto máxima, taxa de crescimento relativo máxima e “tempo perdido”, que se refere ao tempo gasto pela planta para passar da fase de crescimento exponencial à de crescimento linear.

Os parâmetros biológicos, em vez unicamente dos dados de rendimento, podem ser utilizados como ferramentas que permitem descrever os efeitos das técnicas de cultivo e da disponibilidade de água sobre o sistema de produção (COSTA et al., 1999; LEE et al., 2003). Além disso, esses parâmetros facilitam a compreensão das interações ambiente-planta, permitindo identificar cultivares mais apropriada para um sistema de produção vegetal característico e sob

condições ambientais particulares (LYRA et al., 2003; URCHEI et al., 2000).

A função expolinear baseia-se no pressuposto de que a taxa de crescimento de qualquer cultura é proporcional à radiação fotossinteticamente ativa interceptada, apresentando comportamento exponencial quando as plantas estão isoladas, sem sombreamento mútuo, e comportamento linear após o fechamento do dossel, quando a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa é máxima (MONTEITH, 2000). Essa função tem sido utilizada na estimativa da produção de matéria seca de crisântemos (LEE et al., 2003), alface (LYRA et al., 2003), rosas (COLOMER et al., 2006), cebola, alface e beterraba (TEI et al., 1996), tomate (YUAN et al., 2004), soja (COSTA et al., 1999; PEREIRA, 2002), lentilhas, ervilhas e fava (ISHAG & DENNETT, 1998).

Outros modelos utilizados na simulação de crescimento de plantas são os modelos empíricos, como a função logística (PEARL & REED, 1920) e a de Gompertz (AMER & WILLIAMS, 1957), que não consideram os processos biofísicos e sua aplicação limita-se ao local onde foram gerados. No entanto, esses modelos empíricos apresentam a vantagem de sua ampla aplicação prática e extrema capacidade de simplificação dos resultados (PEREIRA, 2002).

Com relação às variáveis utilizadas para as simulações do crescimento das plantas, tem-se verificado, com maior frequência, a utilização do número de dias após a semeadura (DAS). Porém, levando-se em consideração que o ciclo biológico das culturas varia de acordo com o genótipo e os fatores do clima, e que, sob condições ótimas de radiação solar, a temperatura do ar expressa na forma de unidades térmicas de calor é o principal fator que controla a taxa de crescimento fenológico das plantas (SLACK et al., 1994; YANG et al., 1995), tem-se verificado a existência de inúmeros trabalhos que utilizam o somatório térmico acumulado nos modelos de simulação de crescimento como opção aos dias após a semeadura (LIZASO et al., 2003; ROLIM et al., 2001; SOLER et al., 2007).

Ressalta-se que a adoção de irrigação no estudo foi unicamente no sentido de simular a chuva. De forma alguma, pretende-se, com este estudo, recomendar a adoção de irrigação em culturas consorciadas, uma vez que se trata de um sistema de cultivo eminentemente de sequeiro.

Com isso, este trabalho objetivou analisar o ajuste dos modelos de crescimento expolinear,

logístico e de Gompertz, para estimativa do acúmulo de matéria seca de plantas de feijão-caupi e de milho, sob os sistemas de plantio exclusivo e consorciado, nas condições climáticas do Semiárido brasileiro, visando oferecer subsídios para o planejamento da produção e a tomada de decisão no agronegócio.

Materiais e Métodos

Descrição experimental

Foram conduzidos simultaneamente dois experimentos, em um solo classificado como Podzólico Amarelo eutrófico latossólico com fragipã, textura média, fase caatinga hiperxerófila, relevo plano, moderadamente drenado, com lençol freático a 1,80m de profundidade, situado no Campo Experimental de Bebedouro (09°09'S; 40°22'W) da Embrapa Semiárido, localizada no município de Petrolina-PE. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSw^h, caracterizado como clima semiárido, com estação chuvosa compreendida entre os meses de janeiro e abril.

Foram utilizadas as cultivares Caatingueiro e Guaribas, respectivamente de milho e feijão-caupi, semeadas em sistema de plantio exclusivo (PE) e consorciado (PC), irrigados por gotejamento, sob delineamento experimental inteiramente casualizado, com cinco repetições, em que cada parcela útil foi constituída por três fileiras, com comprimento igual a 10 m e 15m, para o primeiro e segundo experimento, respectivamente.

No tratamento sistema exclusivo, o feijão-caupi foi plantado no espaçamento de 0,70 m entre fileiras e 0,30 m entre plantas, com uma densidade média no plantio de 50.125 plantas ha⁻¹, e o milho foi semeado no espaçamento de 0,70 m entre fileiras e 0,35 m entre plantas, totalizando uma densidade no plantio de 40.000 plantas ha⁻¹. No sistema consorciado, o espaçamento entre as fileiras de feijão-caupi e de milho foi de 1,00 m, sendo a densidade de plantas na ordem de 25.000 e 20.000 plantas por hectare, respectivamente, para o feijão-caupi e milho.

Durante os experimentos, foram realizadas avaliações do comportamento fenológico das culturas, por meio de visitas diárias à área experimental, para observação visual do desenvolvimento das culturas, identificação das datas de ocorrência dos eventos fenológicos e delimitação da duração dos subperíodos (semeadura-emergência, emergência-floração, floração-

maturação e maturação-colheita), em dias e graus-dias acumulados (GDA).

Medições de fitomassa seca acumulada das culturas

Para a obtenção da fitomassa seca acumulada foram amostradas plantas de feijão-caupi aos 9, 23, 38, 51, 65 e 77 dias após a semeadura (DAS) e de milho aos 13, 25, 46, 55, 68, 82 e 103 DAS em cada um dos sistemas de plantio. Foi selecionada uma planta representativa em cada repetição, totalizando cinco plantas para cada sistema de cultivo (exclusivo e consorciado). As plantas selecionadas foram levadas ao laboratório, separadas em caules, folhas e vagens ou espigas, e cada parte foi colocada em estufa com ventilação forçada, onde permaneceram por 72 horas, à temperatura de 70°C ou até obtenção de peso seco constante. Posteriormente, o material foi pesado em balança com precisão de ± 0,001g, para quantificação da matéria seca da parte aérea.

Modelos de simulação de crescimento

Os dados de fitomassa seca acumulada (FSA), DAS e GDA do primeiro experimento, para os sistemas de cultivo exclusivo e consorciado, foram utilizados na determinação dos parâmetros dos modelos de simulação de crescimento para a culturas do feijão-caupi e milho, utilizando o software SigmaPlot, versão 7.0 para Windows. Por meio desse software, também foram obtidos os valores do coeficiente de determinação (R^2_{aj}) para se avaliar os ajustes dos modelos aos dados experimentais.

Para a simulação do crescimento das plantas de feijão-caupi e de milho, foram utilizados os modelos expolinear, logístico e de Gompertz, os quais foram ajustados de acordo com as variáveis independentes “dias após a semeadura” (DAS) ou “graus-dias” (GDA). Os ajustes dos modelos foram realizados com base no logaritmo dos valores de FSA ($\ln(W)$), conforme proposto por Tei et al. (1996):

- Expolinear

$$\ln(W) = \ln\left(\frac{c_m}{r_m}\right) + \ln\left[\ln\left(1 + \exp(r_m(x - t_p))\right)\right] \quad (1)$$

- Logístico

$$\ln(W) = \ln(w_f) - \ln\left[1 + (w_f / w_0 - 1) \exp(-r_m x)\right] \quad (2)$$

- Gompertz

$$\ln(W) = \ln(w_0) + r_m \left[1 - \exp(-r_d x)\right] / r_d \quad (3)$$

em que, c_m é a taxa máxima de crescimento absoluto (g m⁻² d⁻¹); r_m é a taxa máxima de crescimento relativo

(g g⁻¹ d⁻¹); x representa dias (DAS) ou graus-dias acumulados (GDA); t_p é o tempo necessário para o fechamento do dossel (em DAS ou GDA); w_o e w_f correspondem, respectivamente, a fitomassa seca da parte aérea da planta (g m⁻²) no início e final do ciclo da cultura, respectivamente; r_d é o parâmetro que define o decréscimo da taxa de crescimento relativo.

Determinação dos graus-dias acumulados (GDA)

Foram utilizados os dados de temperatura do ar obtidos em uma estação meteorológica automática, instalada a 100 m da área experimental. Para o cálculo dos graus-dia acumulados (GDA), foram utilizados os valores diários de temperatura do ar máxima (t_x) e mínima (t_n) e a seguinte equação:

$$GDA = \sum_{n=1}^{100} \left[\left(\frac{t_x + t_n}{2} - t_b \right) \right] \quad (4)$$

Em que, t_b = temperatura base inferior, considerada igual a 10°C para ambas as culturas.

Avaliação do desempenho dos modelos

Após a parametrização dos modelos com os dados de um experimento, os mesmos foram utilizados na estimativa dos valores de matéria seca acumulada das plantas, utilizando as variáveis independentes (DAS e GDA) do segundo experimento e, posteriormente, os resultados estimados foram comparados com os valores observados de FSA. O desempenho dos modelos foi avaliado utilizando os índices estatísticos de precisão (coeficiente de correlação, r) e de exatidão (índice de concordância, d) (WILLMOTT et al., 1985). Também foram estimados o erro médio de estimativa (MBE) e a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE). As expressões utilizadas para a estimativa de cada um dos índices e erros estatísticos podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Índices e erros estatísticos utilizados para avaliar o desempenho dos modelos.

Índices estatísticos	Símbolo	Equação*	Intervalo de variação	Valor ideal
Coefficiente de correlação	r	$\frac{[\sum P (O_i - \bar{O}_i)]}{\left[\sum_{n=1}^n (O - \bar{O})^2 \sum_{n=1}^n (P - \bar{P})^2 \right]^{1/2}}$	-1 ≤ e ≤ +1	-1 e +1
Índice de concordância	d	$\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P - \bar{O} + \bar{O} - \bar{P})^2} \right]^{1/2}$	0 ≤ e ≤ +1	+1
Erro médio de estimativa	MBE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$	0 < e ≤ 0	0
Raiz quadrada do erro médio	RMSE	$\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P - O)^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P - \bar{O})^2 \right]^{1/2}$	≥ 0	0

*P_i = valor estimado pelo modelo; O_i = valor observado; \bar{P}_i = média dos valores estimados e \bar{O}_i = média dos valores observados; n = número de pares de dados.

Resultados e discussão

Para as culturas do feijão-caupi e do milho, submetidas aos sistemas de cultivo exclusivo (PE) e consorciado (PC), observou-se bom ajuste na determinação dos parâmetros, para todos os modelos, utilizando tanto DAS (dias após a semeadura), como variável independente, quanto GDA (graus-dia acumulados). Os valores dos coeficientes de determinação (R^2_{aj}) foram superiores a 0,96 (Tabela 2). Porém, constatou-se melhor ajuste dos modelos para as plantas do feijão e do milho submetidas ao sistema de plantio exclusivo. A única exceção foi em relação ao modelo logístico, que, para a cultura do milho, sob sistema de cultivo consorciado, os resultados de R^2_{aj} foram superiores (0,9773 e 0,9651), quando comparado ao sistema de cultivo exclusivo (0,9653 e 0,9644).

O resultado da avaliação dos modelos utilizando dados do segundo experimento, conduzido na mesma época do primeiro, estão mostrados nas Figuras 1 e 2, para as culturas do feijão e do milho, submetidas aos dois sistemas de cultivo (PE e PC). Nelas também são apresentados os valores dos índices estatísticos r (coeficiente de correlação) e d (índice de concordância), bem como dos erros estatísticos (MBE e RMSE), que indicam, nessa ordem, a sub ou superestimativa dos resultados dos modelos e o erro referente ao erro médio de estimativa da fitomassa seca acumulada de uma determinada data (JACOVIDES & KONTOYIANNIS, 1995).

(PE e PC) quanto para as duas variáveis independentes utilizadas (DAS e GDA). Para a cultura do feijão-caupi no sistema de PE (Figura 1A, 1B, 1E, 1F, 1I e 1H), o modelo expolinear, quando se utilizou GDA como a variável independente, apresentou $r = 0,9981$ e $d = 0,9995$; valores foram inferiores aos obtidos com a utilização da variável DAS, porém as diferenças foram muito pequenas e quase irrelevantes ($r = 0,9984$ e $d = 0,9996$) (Figura 1A). Porém, os melhores resultados foram obtidos com o modelo de Gompertz, resultados esses semelhantes aos obtidos por Tei et al. (1996), para a cultura da alface. Os valores de r e d foram iguais a 0,9985 e 0,9996, respectivamente, resultando em MBE igual a 0,9735 g m⁻² e RMSE equivalente a 1,0075 g m⁻², quando utilizou-se a variável GDA (Figura 1F). Utilizando-se DAS como variável independente, os valores de MBE e RMSE foram iguais a 0,9865 e 1,0085, respectivamente. Desempenho semelhante foi constatado no sistema de PC, em que o modelo de Gompertz também apresentou resultados ligeiramente superiores, sendo a diferença observada apenas na terceira casa decimal, demonstrando que não houve diferenças expressivas (Figuras 1G e 1H). O modelo logístico para a cultura do feijão-caupi foi o que apresentou menores valores de r e d para ambos os sistemas de plantio (PE e PC), sendo os valores de r iguais a 0,9983 e 0,9974 (Figuras 1I e 1J) e 0,9882 e 0,9867 (Figuras 1K e 1L), e os valores de d foram de 0,9996 e 0,9994 e 0,9951 e 0,9945, respectivamente,

Tabela 2. Coeficiente de determinação dos modelos Expolinear, Gompertz e Logístico para as culturas do feijão-caupi e do milho, sob os sistemas de cultivo exclusivo e consorciado em função das variáveis independentes dias após a semeadura (DAS) e graus-dia acumulados (GDA).

Feijão-caupi				
	Sistema de plantio exclusivo		Sistema de plantio consorciado	
Modelo	DAS	GDA	DAS	GDA
Expolinear	0,9977	0,9967	0,9826	0,9808
Gompertz	0,9978	0,9987	0,9887	0,9857
Logístico	0,9931	0,9920	0,9822	0,9793
Milho				
	Sistema de plantio exclusivo		Sistema de plantio consorciado	
Modelo	DAS	GDA	DAS	GDA
Expolinear	0,9841	0,9851	0,9861	0,9865
Gompertz	0,9869	0,9864	0,9869	0,9863
Logístico	0,9653	0,9644	0,9773	0,9651

Os três modelos apresentaram ótimo desempenho estatístico, resultando em pequenas superestimativas, tanto para os dois sistemas de cultivo

para as variáveis independentes DAS e GDA, nos sistemas de cultivo PE e PC, resultando em maiores erros de estimativa.

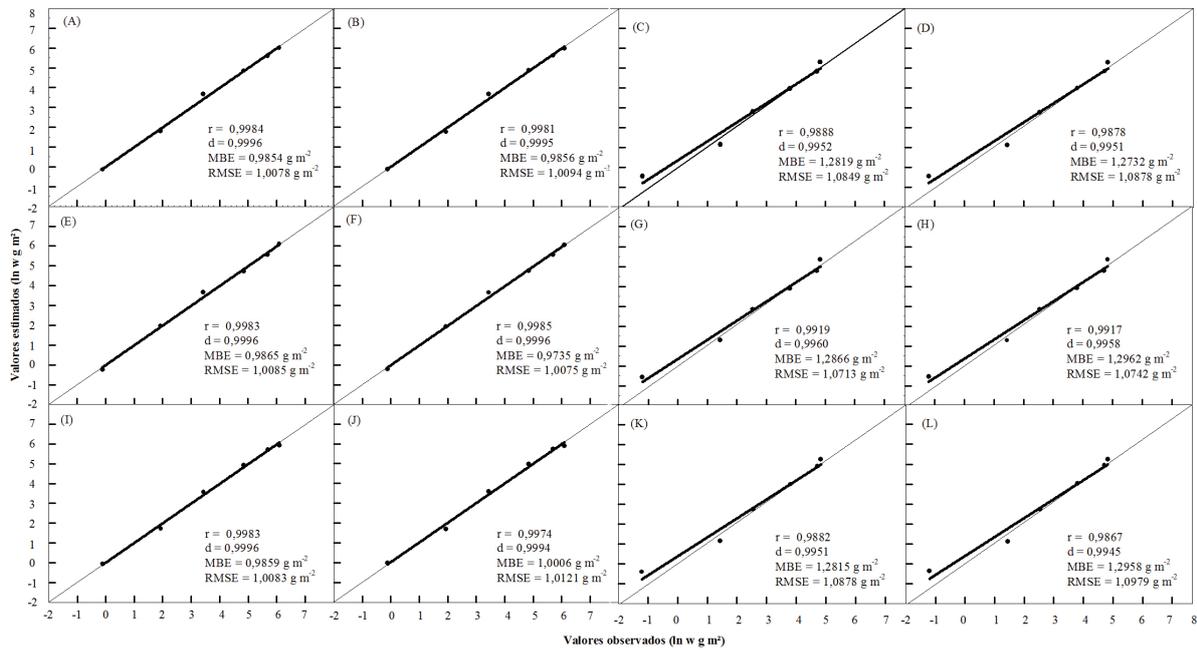


Figura 1. Avaliação do desempenho dos modelos expolinear (A, B, C e D), Gompertz (E, F, G e H) e logístico (I, J, K e L), utilizando como variáveis independentes dias após a semeadura (A, C, E, G, I e K) e graus-dias (B, D, F, H, J e L) na simulação do crescimento da cultura do feijão (*Vigna unguiculada* L.), cultivar Guaribas, em sistema de cultivo exclusivo (A, B, E, F, I e J) e consorciado (C, D, G, H, K e L), nas condições do Semiárido brasileiro.

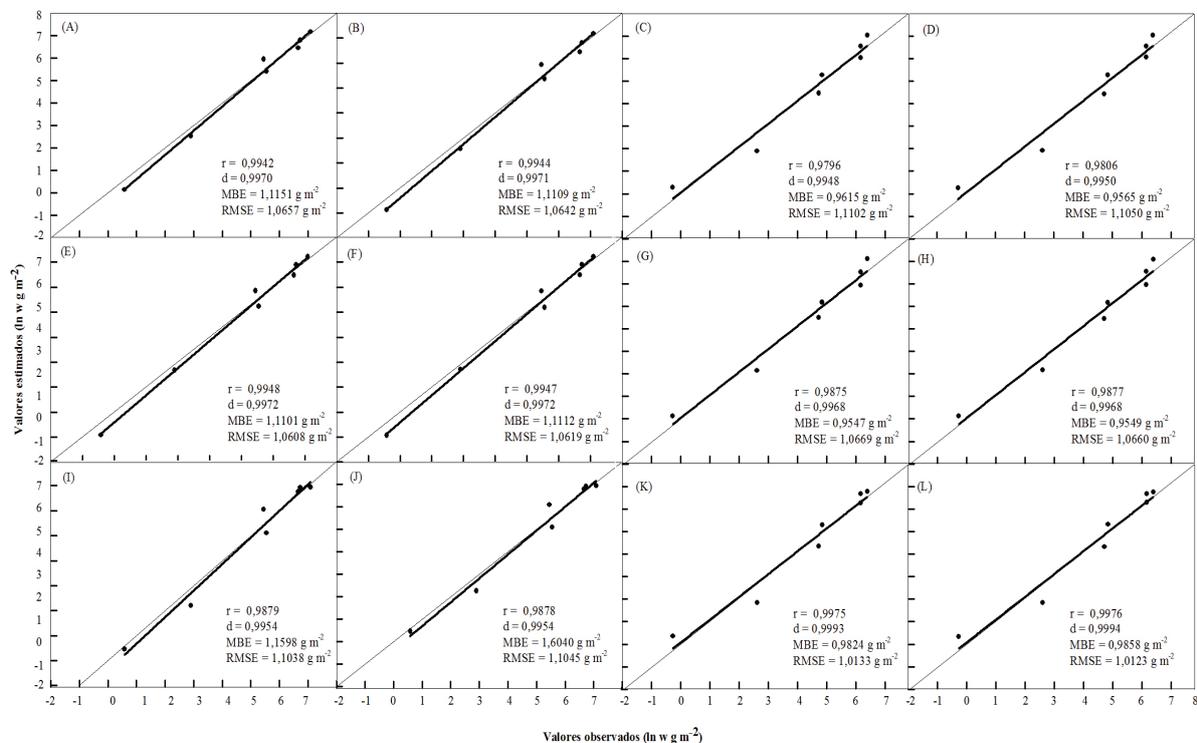


Figura 2. Avaliação do desempenho dos modelos expolinear (A, B, C e D), Gompertz (E, F, G e H) e logístico (I, J, K e L), utilizando as variáveis independentes dias após a semeadura (A, C, E, G, I e K) e graus-dias (B, D, F, H, J e L) na simulação do crescimento da cultura do milho (*Zea Mays* L.), cultivar Caatingueiro, em sistema de cultivo exclusivo (A, B, E, F, I e J) e consorciado (C, D, G, H, K e L), nas condições do Semiárido brasileiro.

Apesar dos bons ajustes obtidos pelos modelos utilizando a variável independente DAS, recomenda-se a utilização da variável GDA, uma vez que esta se utiliza dos registros de temperatura, fator que influencia diretamente na taxa de crescimento da cultura. Assim, pode descrever de forma mais precisa a influência dos processos bioclimáticos no desenvolvimento do vegetal, o que pode não ser constatado com o emprego da variável DAS, para a qual sua utilização é limitada às condições climáticas do local do experimento (LYRA et al., 2003).

Para a cultura do milho, semelhante ao observado para o feijão-caupi, o melhor desempenho foi constatado para o sistema de PE utilizando o modelo de Gompertz, cujos valores de r foram de 0,9948 e 0,9847 e os valores de d iguais a 0,9972 e 0,9972, para as variáveis independentes GDA e DAS, respectivamente. O mesmo resultado não foi constatado para o sistema de PC, no qual se destacou o modelo logístico. No sistema de PC, o modelo Gompertz apresentou os valores de r e d iguais a 0,9877 e 0,9968 (Figura 2H), respectivamente, resultando em erros de estimativa de 0,9549 e 1,0660 g m⁻² utilizando a variável GDA. Quando se analisou os valores obtidos com a variável DAS, verificou-se que estes foram bastante similares aos obtidos com a variável GDA, sendo o r e d iguais a 0,9875 e 0,9968, resultando em MBE e RMSE da ordem de 0,9547 g m⁻² e 1,0669 g m⁻². Para o modelo expolinear, constatou-se que, no sistema de PC (Figura 2C e 2D), os valores de r e d foram superiores em ambas as variáveis independentes (DAS e GDA), quando comparados ao sistema de PE (Figura 2A e 2B). No primeiro sistema, os valores dos erros de estimativa (MBE e RMSE) atingiram 0,9615 e 1,1102 g m⁻² e 0,9565 e 1,1050 g m⁻², nessa ordem, referindo-se às variáveis DAS e GDA.

Verificou-se que o desempenho dos modelos supracitados foi melhor para a cultura do feijão-caupi, quando comparado à cultura do milho, e que os melhores ajustes foram obtidos para o sistema de plantio exclusivo. Tais resultados podem estar associados à capacidade dos modelos de melhor descrever o crescimento das plantas sob condições ótimas de crescimento, o que acaba não ocorrendo em sistemas de plantio em consórcio, onde as culturas têm seu desenvolvimento mais limitado, devido ao nível de competição por água, luz e nutrientes (HEREDIA ZARATE et al., 2003, URCHIEI et al., 2000).

Apesar de o modelo expolinear não ter apresentado melhor desempenho dentre os analisados, tem-se constatado a ampla utilização do mesmo em

diferentes estudos, devido ao fato de ele considerar parâmetros biofísicos de crescimento das plantas. Lee et al. (2003) constataram que o modelo expolinear permitiu quantificar e comparar com elevada precisão ($> 0,98$) os parâmetros de crescimento da cultura do crisântemo sob diferentes condições de densidade (32, 48, 64 e 80 plantas m⁻²), de épocas de plantio (janeiro, maio-junho e setembro) e de regime de luz natural (66 e 43%) e suplementar (40-48 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Yuan et al. (2004), utilizando como variável independente DAE (dias após a emergência), obtiveram ajustes do modelo expolinear superior a 0,9780, para a cultura do tomate, sob ótimas condições de cultivo.

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentados os valores dos parâmetros dos modelos Expolinear, Gompertz e Logístico, obtidos para as culturas do feijão-caupi e do milho, para dois sistemas de plantio, e para as duas variáveis independentes avaliadas. Considerando os valores dos parâmetros biológicos do modelo expolinear obtidos para variável independente DAS, foi observado que as plantas do feijoeiro submetidas ao sistema de PE apresentaram valores médios da taxa de crescimento relativo (r_m) e da taxa de crescimento absoluto (c_m) iguais a 0,1397 g g⁻¹ dia⁻¹ e 11,3973 g m⁻² dia⁻¹, enquanto que, para o mesmo sistema de plantio, o milho obteve valores iguais a 0,2035 g g⁻¹ dia⁻¹ e 18,6909 g m⁻² dia⁻¹, respectivamente. No sistema de PC, os valores de r_m e c_m para o feijão-caupi, foram iguais a 0,1168 g g⁻¹ dia⁻¹ e 6,7531 g m⁻² dia⁻¹, respectivamente, sendo que, para o milho, esses valores foram da ordem de 0,1359 g g⁻¹ dia⁻¹ e 20,3467 g m⁻² dia⁻¹, verificando que o valor de c_m foi superior para o sistema PC.

Observa-se que, para o feijão-caupi, o valor de c_m do sistema PE foi praticamente o dobro, em relação ao valor obtido pelas plantas do sistema PC. Esse resultado se deve ao fato de o feijão-caupi ter sido cultivado em dois sistemas de plantio que apresentavam densidades diferentes (PE: 5,0 plantas m⁻² e PC: 2,5 plantas m⁻²), ou seja, as fitomassas secas acumuladas na mesma unidade de área e tempo (78 dias) foram diferentes, o que também pode ser explicado pela competição por água, luz e nutrientes no sistema consorciado. Nesse caso, devido à fitomassa seca acumulada ser diferente na mesma unidade de tempo, em função da densidade, para ambos os cultivos e sistemas de plantio, somente os valores de c_m não são bons indicadores do efeito do sistema de produção, devendo-se considerar os valores de r_m , uma vez que este representa o acréscimo de fitomassa seca em relação à quantidade anterior.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos expolinear, Gompertz e logístico, para a cultura do feijão-caupi, sob os sistemas de cultivo exclusivo e consorciado, em função das variáveis independentes dias após a semeadura (DAS) e os graus-dia acumulados (GDA).

Sistema de plantio	Modelo	Parâmetros dos modelos	Unidades	DAS	GDA
Exclusivo	Expolinear	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1397	0,008
		c_m	$g\ g^{-1}\ dia^{-1}$	11,3973	0,5555
		t_b	dias ou graus-dia	42,4407	727,48
	Logístico	w_f	$g\ m^{-2}$	399,121	380,114
		r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1284	0,0072
	Gompertz	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,2317	0,0137
r_d			0,1397	0,008	
Consórcio	Expolinear	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1168	0,0066
		c_m	$g\ g^{-1}\ dia^{-1}$	6,7531	0,3224
		t_b	dias ou graus-dia	48,5488	837,169
	Logístico	w_f	$g\ m^{-2}$	223,933	209,72
		r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1113	0,0062
	Gompertz	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1813	0,0181
		r_d		0,0107	0,00112

Tabela 4. Parâmetros dos modelos expolinear, Gompertz e logístico, para a cultura do milho, sob os sistemas de cultivo exclusivo e consorciado, em função das variáveis independentes dias após a semeadura (DAS) e graus-dia acumulados (GDA).

Sistema de plantio	Modelo	Parâmetros dos modelos	Unidades	DAS	GDA
Exclusivo	Expolinear	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,2035	0,0114
		c_m	$g\ g^{-1}\ dia^{-1}$	18,6909	1,0040
		t_b	dias ou graus-dia	34,4696	616,5370
	Logístico	w_f	$g\ m^{-2}$	926,6070	905,8670
		r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1369	0,0077
	Gompertz	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,4218	0,0239
r_d			0,0357	0,0020	
Consórcio	Expolinear	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1359	0,0077
		c_m	$g\ g^{-1}\ dia^{-1}$	20,3467	1,0375
		t_b	dias ou graus-dia	47,8075	840,5220
	Logístico	w_f	$g\ m^{-2}$	879,3810	849,1360
		r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,1237	0,0069
	Gompertz	r_m	$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$	0,2658	0,0152
		r_d		0,0247	0,0014

Os valores de r_m obtidos tanto para o feijão-caupi quanto para o milho, nos dois sistemas de cultivo, foram menores que os obtidos para o sorgo (0,19 – 0,24 g g dia⁻¹) (GOUDRIAAN & MONTEITH, 1990; MONTEITH, 2000) e alface (0,2606 g g dia⁻¹) (LYRA et al., 2003) e superiores aos do feijão comum (0,1300) (GOUDRIAAN & MONTEITH, 1990) e alho (0,1300) (TEI et al., 1996). Devido aos modelos de Gompertz e Logístico não apresentarem fundamentação biológica plena, os valores de r_m obtidos devem ser interpretados com cautela (LYRA et al., 2003).

Com os resultados, foi possível constatar que as plantas do sistema PE apresentaram maior desempenho morfofisiológico, quando comparada com as plantas do sistema PC, uma vez que obtiveram valor de r_m superior. Nas plantas dos sistemas PE, o tempo para o fechamento do dossel (t_p) foi da ordem de 42,4 e 34,5 dias, para as culturas do feijão-caupi e milho, nesta ordem, sendo inferiores aos obtidos no sistema PC, cujo valor foi igual a 48,5 e 47,8 dias, para o feijão-caupi e milho, respectivamente, indicando que, no sistema PE, as plantas permaneceram mais tempo produzindo grãos, quando comparadas com aquelas do sistema PC.

Conclusão

Com os dados de fitomassa seca acumulada das culturas do feijão-caupi e milho, em sistemas de plantio exclusivo e consorciado, e por meio da utilização das variáveis independentes dias após a semeadura (DAS) e graus dias acumulados (GDA), concluiu-se que: a) o modelo de Gompertz foi o que apresentou melhores ajustes na simulação de crescimento das plantas; no entanto, o modelo expolinear apresenta grandes possibilidades de aplicação, por considerar parâmetros biológicos; b) os melhores resultados dos modelos foram obtidos para o sistema de plantio exclusivo; c) os valores de DAS favoreceram os maiores desempenhos dos modelos avaliados, porém a sua aplicabilidade limita-se ao local experimental; e) os parâmetros biológicos gerados pelo modelo expolinear sugerem que o feijão-caupi e o milho, em sistema de cultivo exclusivo, tiveram desenvolvimento morfofisiológico superior quando comparado ao sistema consorciado; f) os modelos calibrados e validados podem ser acoplados, na forma de submodelos, por exemplo, em estudos de avaliação dos impactos de mudanças climáticas sobre o crescimento das culturas do feijão-caupi e do milho cultivados sob as condições do Semiárido nordestino.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao MDA (Ministério do Desenvolvimento Agrário) e à Embrapa o apoio financeiro e à FUNCAMP a concessão de bolsa, junto ao projeto componente “Desenvolvimento de métodos de estimativa de riscos climáticos para culturas consorciadas e de apelo regional”, do projeto “Zoneamento de Riscos Climáticos: abordagem para agricultura familiar, bioenergia e pastagens”.

Referências bibliográficas

- 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.
- BEZERRA NETO, F.; TORRES FILHO, J.; HOLANDA, J. S. de; SANTOS, E. F.; ROSADO, C. A. de S. Efeito do sistema de cultivo e arranjo espacial no consórcio algodão herbáceo + caupi + sorgo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 26, n. 5, p. 715-727, 1991.
- COLOMER, R. P.; GONZALEZ-REAL, M. M.; BAILLE, A. Dry matter production and partitioning in rose (*Rosa hybrida*) flower shoots. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v.107, p.284–291, 2006.
- COSTA, L. C.; FERREIRA, E. A.; SEDIYAMA, G. C.; MATOVANI, E. C.; CECON, P. R. 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.
- 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, p. 695-701, 1990.
- HEREDIA ZARATE, N. A.; VIEIRA, M. C.; WEISMANN, M.; LOURENÇÃO, A. L. F. Produção e renda bruta de cebolinha e de salsa em cultivo solteiro e consorciado. *Horticultura Brasileira*, Brasília, DF, v. 21, n. 3, p. 574-577, 2003.

- ISHAG, K. H. M.; DENNETT, M. D. Use of the Exponential Growth Model to Analyze the Growth of Faba bean, Peas and Lentils at Three Densities: Fitting the Model. **Annals of Botany**, London, v. 82, p. 497-505, 1998.
- JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 27, p. 365-371, 1995.
- LEE, J. H.; GROUDRIAAN, A.; CHALLA, H. Using the exponential growth equation for modeling crop growth in year-round cut chrysanthemum. **Annals of Botany**, London, v. 92, p. 697-708, 2003.
- LIZASO J. I.; BATCHELOR, W. D.; WESTGATE, M. E. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 80, p.1-17, 2003.
- LYRA, G. B.; ZOLNIER, S.; COSTA, L. C. da; SEDIYAMA, G. C.; SEDIYAMA, M. A. N. Modelos de crescimento para alface (*Lactuca sativa L.*) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 69-77, 2003.
- MONTEITH, J. L. Fundamental equations for growth in uniform stands of vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 104, p. 5-11, 2000.
- PEARL, R.; REED, L. J. Skew growth curves. **Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States**, Washington, v. 6, p.16-22, 1920.
- PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura da soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ROLIM, G. de S.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Análise de risco climático para a cultura de girassol, em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, usando os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 69-77, 2001.
- SLACK, D.C.; FOX, F. A.; MARTIN JUNIOR, E. C.; CLARK, L.J. Growing-degree-days based crop coefficients for irrigation management. In: CONGRESO NACIONAL ASOCIACION MEXICANA DE INGENIERIA AGRICOLA, 4., 1994, Cuautitlán Izcali. **Anais...** Cuautitlán Izcali: Asociacion Mexicana de Ingenieria Agricola, 1994. p. 7-13.
- SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European Journal Agronomy**, Oxford, v. 27, p. 165-177, 2007.
- 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, 1996a
- 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, 1996b.
- URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 3, p. 497-506, 2000.
- YUAN, F. M.; BLAND, W. L. Light and temperature modulated exponential growth model for potato (*Solanum tuberosum L.*). **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.121, p. 141-151, 2004.
- WILLMOTT, C. J; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; DONNEL, J. O.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.
- YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree-days. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, n. 1/2, p. 61-74, 1995.