

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA BIOMASSA SECA DO MILHO NA REGIÃO SUBTROPICAL DO BRASIL

GRABARSKI, F. A. P.¹; SOUZA J.L.M.²; PAULETTI, V.²

¹Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFPR; ²Professor, DSEA/SCA/UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br.

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca do milho na região dos Campos Gerais, com as variáveis radiação solar incidente (*Rs*), graus dia acumulados (*GDA*) e dias após o plantio (*DAP*). Os experimentos foram conduzidos em quatro áreas pertencentes a Fundação ABC, nas safras 2006/2007 e 2007/2008, em Castro e Ponta Grossa. Foram coletadas amostras de planta inteira, em quatro estádios fenológicos da cultura, para obtenção da biomassa seca do milho. Os dados climáticos necessários são provenientes das estações agrometeorológicas próximas às áreas experimentais. O ajuste dos parâmetros foi realizado com o Método dos Mínimos Quadrados e Ferramenta Solver de uma planilha eletrônica. As safras de milho que tiveram maior *Rs*, *GDA* e *DAP* para atingir o estágio de maturação fisiológica foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca. As safras com maiores valores de *GDA* e *Rs* tiveram maior acúmulo de biomassa seca ao longo do ciclo. A associação do acúmulo da biomassa seca do milho e variáveis testadas foi satisfatória na calibração. Verificou-se em relação ao desempenho, resultados promissores entre “mau” e “ótimo” ($0,41 \leq “c” \leq 1$), predominantemente “ótimo” (“*c*” > 0,85). Mesmo com bons ajustes na calibração para o milho, a validação indicou altos erros absolutos e relativos nas safras.

Palavras-chave: Cultivo agrícola, modelos de crescimento, soma térmica, *Zea mays*, biomassa seca.

INTRODUÇÃO

O Brasil é responsável pelas maiores produções agrícolas do mundo, devido às condições favoráveis de solo, clima e extensão territorial, com grande representatividade nas exportações de produtos do agronegócio (Scolari, 2006). O país destaca-se na produção agrícola nas últimas décadas, devido ao aumento da produtividade, com redução dos impactos ambientais, sem que haja abertura de novas áreas. Entre todos os produtos agrícolas que o país produz, os grãos têm grande destaque na economia, principalmente a cultura do milho (Johann et al., 2012).

Para explorar o máximo potencial produtivo é necessário que alguns fatores estejam de acordo com as exigências das culturas, como clima, manejo de nutrientes e pragas, entre outros. Aspectos do clima como temperatura e radiação solar, devem atender as exigências da cultura (Fancelli e Dourado-Neto, 2000). A radiação solar incidente (R_s) é importante em várias áreas, sendo a principal fonte de energia no meio ambiente, e fundamental para a fotossíntese e desenvolvimento dos vegetais (Chukwujindu, 2017).

O uso de funções e modelos matemáticos é uma excelente alternativa para estimar a produção vegetal, possibilitando a avaliação da dinâmica do crescimento vegetal e crescimento final das plantas (Peixoto e Peixoto, 2004). Assim, o estudo de sistemas agrícolas usando modelos e dados que caracterizam como determinado sistema se comporta em circunstâncias específicas é fundamental. Os dados são primordiais para desenvolver, avaliar e executar modelos, visando simular inferências sobre o sistema real. Os modelos permitem a utilização de ferramentas computacionais, que ajudam a identificar as melhores opções e os riscos associados (Jones et al., 2017).

Existem vários modelos na literatura que procuram relacionar duas ou mais variáveis (Araújo et al., 2014), sendo comum utilizar os graus dia acumulados, radiação solar incidente e dias após plantio. Nesse contexto, alguns coeficientes são definidos como padrão na literatura, e também podem ser estimados regionalmente, apresentando valores mais confiáveis da biomassa seca total das culturas.

Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente trabalho calibrar e validar modelos recomendados para estimar a produtividade de biomassa seca do milho na região dos Campos Gerais, estado do Paraná, com as variáveis a radiação solar incidente (R_s), graus dia acumulados (GDA) e dias após o plantio (DAP).

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se na Região dos Campos Gerais, Estado do Paraná, em duas cidades com as seguintes características do solo e clima: *i*) Ponta Grossa, contendo Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006), textura argilo arenosa (450 g kg^{-1} de argila, 450 g kg^{-1} de areia e 100 g kg^{-1} de silte), relevo suave ondulado e clima subtropical úmido (Cfb), conforme classificação de Köppen. As coordenadas geográficas próximas dos locais dos experimentos são $25^\circ 00' 53'' \text{ S}$ e $50^\circ 09' 07'' \text{ W}$; *ii*) Castro, contendo Latossolo Bruno Distrófico típico ácrico A proeminente (EMBRAPA/FABC, 2001), textura muito

argilosa, declividade de 9,6% e clima local subtropical (*Cfb*), conforme classificação de Köppen. As coordenadas geográficas próximas dos locais dos experimentos são 24° 51' 50" S e 49° 56' 25" W. Ponta Grossa e Castro apresentam temperatura média de 17,5 °C e 16,9 °C e precipitação média de 1495 mm e 1553 mm por ano, respectivamente.

Os dados de crescimento e desenvolvimento do milho são provenientes de experimentos anteriores, conduzidos em quatro áreas pertencentes a Fundação ABC, nas safras 2006/2007 e 2007/2008, em Castro e Ponta Grossa (Tabela 1).

Tabela 1. Número de experimentos conduzidos para a cultura do milho, com identificação da safra e local de instalação.

Cultura	-----Local/Safra-----				Total
	----- Castro -----		----- Ponta Grossa -----		
	2006/2007	2007/2008	2006/2007	2007/2008	
Milho	1	2	—	1	4

As cultivares utilizadas, datas de semeadura e local de cada safra encontram-se apresentadas na Tabela 2. Nas áreas experimentais foram coletadas quatro amostras de plantas inteiras para a determinação da biomassa aérea, em cada estágio fenológico, determinado para cada cultura analisada: vegetativo 4 (V4), vegetativo 8 (V8), pleno florescimento (PF) e maturação fisiológica (MF). As plantas foram coletadas à aproximadamente 1 cm da superfície do solo.

Tabela 2. Cultivares e data da semeadura de acordo com o local e safra de cultivo.

Cultura	Cultivar	Local	Safra	Semeadura
Milho	P 30F53	Castro	2006/2007	28/09/2006
	P 30F53	Castro	2007/2008a	04/10/2007
	P 30F53	Castro	2007/2008b	10/10/2007
	P 30F53	Ponta Grossa	2007/2008	03/10/2007

No último estágio, as plantas foram coletadas e divididas em grãos e biomassa aérea. Após o corte, as plantas foram pesadas a campo para quantificar a biomassa fresca. Todo o material coletado e pesado foi enviado ao laboratório para secagem em estufa a 70 °C até peso constante, para quantificação da biomassa seca, para os dois primeiros estágios fenológicos. Para os dois estágios finais, devido ao volume de material coletado, uma amostra de plantas inteiras que foram pesadas frescas foi separada e enviada ao laboratório para devida secagem. Com os dados da biomassa fresca total da área coletada, e com a determinação da umidade da amostra, calculou-se a biomassa por hectare.

No estudo, foram ajustados os parâmetros dos modelos: Streibig (1988), Gompertz e Philos (1825) e Ratkowsky (1983). O ajuste foi realizado com o Método dos Mínimos Quadrados e Ferramenta *Solver* de uma planilha eletrônica. Após o ajuste individual para cada safra verificou-se o desempenho dos modelos e identificou-se os melhores, sendo realizada a calibração com pelo menos três safras de locais e anos diferentes. Posteriormente, foi realizada a validação de cada modelo com safras não utilizadas na calibração. Para a calibração, foram utilizadas as safras: “Castro 2006/2007”, “Castro 2007/2008a” e “Ponta Grossa 2007/2008”. Para a validação, utilizou-se a safra “Castro 2007/2008b”.

Os modelos consideram a entrada das variáveis: dias após o plantio (*DAP*), graus dia acumulados (*GDA*) e radiação solar incidente acumulada (*Rs*). Os dados climáticos foram obtidos em estações climatológicas dispostas próximas aos locais do experimento.

– Modelo logístico não linear, proposto por Streibig (1988):

$$y(x_i) = \frac{a}{1 + \left(\frac{x_i}{c}\right)^b} \quad (1)$$

– Modelo não linear, proposto por Gompertz e Philos (1825):

$$y(x_i) = a \cdot \exp[-b \cdot \exp(-c \cdot x_i)] \quad (2)$$

– Modelo não linear, proposto por Ratkowsky (1983):

$$y(x_i) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{(-c \cdot x_i)}} \quad (3)$$

Sendo: $y(x_i)$ – biomassa seca total em função da variável x (kg ha^{-1}); x_i – valor da variável independente, sendo avaliado no presente estudo os i -ésimo dias após o plantio (D ; dia), graus dia acumulados até o i -ésimo dia (GD_i ; $^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente acumulada até o i -ésimo dia (Rs_i ; $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); a , b e c – parâmetros da equação (a : kg ha^{-1} ; b : adimensional; c : mesma unidade da variável independente).

As análises estatísticas foram realizadas seguindo as recomendações de Souza (2018). As associações entre os valores observados (reais) e estimados (com os modelos) foram verificadas em análises de regressão linear simples. Para comparação, foram calculados os erros absolutos (Ea) e relativos (Er), coeficiente de determinação (R^2) e correlação de Pearson (R), índice de concordância “ d ” de Willmott, que indica como os pontos medidos e estimados estão afastados da reta 1:1, e índice “ c ” de Camargo e Sentelhas, que mede o desempenho do modelo. Os valores do índice “ c ” indicam o seguinte desempenho do modelo testado: “ótimo” (“ c ” $> 0,85$); “muito bom” ($0,76 \leq “c” \leq 0,85$); “bom” ($0,66 \leq “c” \leq 0,75$); “mediano” ($0,61 \leq “c” \leq 0,65$); “sofrível” ($0,51 \leq “c” \leq 0,60$); “mau” ($0,41 \leq “c” \leq 0,50$); e, “péssimo” (“ c ” $\leq 0,40$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As safras que tiveram maior período de dias após o plantio para atingir o estágio de maturação fisiológica foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca (Tabela 3). O mesmo aconteceu para as variáveis radiação solar incidente (Rs) e graus dia acumulados (GDA).

As safras de milho “Castro 07/08a” e “Ponta Grossa 07/08” foram as que tiveram maior tempo para atingir a maturação fisiológica, com 174 e 175 dias após o plantio, respectivamente. Mesmo com apenas um dia de diferença, os graus dia acumulados e a radiação solar incidente acumulada foram relativamente maiores na safra “Ponta Grossa 07/08”. A produtividade final de biomassa seca entre as safras também foi maior, sendo que

ambas superaram as demais (Tabela 3). No estágio pleno florescimento, as safras “Castro 07/08b” e “Ponta Grossa 07/08” apresentaram valores semelhantes de dias após o plantio. Porém, na safra “Ponta Grossa 07/08” houve aumento de 78,6 °C graus dia acumulados e 169,6 MJ m⁻² dia⁻¹ de radiação solar incidente acumulada. A safra “Castro 07/08b” obteve 1164,74 kg ha⁻¹ de redução na produtividade de biomassa em relação à safra “Ponta Grossa 07/08”, evidenciando a influência das variáveis na produtividade de biomassa seca.

Tabela 3. Biomassa seca real, dias após o plantio, graus dia após o plantio e radiação solar incidente acumulada no final de cada estágio fenológico da cultura do milho, nas diferentes safras, na região dos Campos Gerais.

Variável	Safra	Estádios fenológicos			
		V4	V8	PF	MF
Biomassa seca real (kg ha ⁻¹)	C-06/07 ⁽¹⁾	534,40	1019,79	4860,52	3072,22
	C-07/08a ⁽¹⁾	110,92	4332,07	9917,79	17629,99
	C-07/08b ⁽¹⁾	279,02	3423,98	9034,99	14259,64
	P-07/08 ⁽²⁾	1176,99	3307,44	10199,73	20677,49
Dias após o plantio (dia)	C-06/07 ⁽¹⁾	39	68	85	146
	C-07/08a ⁽¹⁾	46	77	97	174
	C-07/08b ⁽¹⁾	35	64	85	160
	P-07/08 ⁽²⁾	48	61	85	175
Graus dia após o plantio (°C)	C-06/07 ⁽¹⁾	374,10	671,95	878,75	1612,40
	C-07/08a ⁽¹⁾	481,75	801,55	1028,85	1834,95
	C-07/08b ⁽¹⁾	377,55	674,80	899,70	1696,05
	P-07/08 ⁽²⁾	549,80	698,80	978,30	2011,25
Radiação solar incidente acumulada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	C-06/07 ⁽¹⁾	708,60	1343,80	1697,70	2946,60
	C-07/08a ⁽¹⁾	740,70	1437,20	1848,50	3140,50
	C-07/08b ⁽¹⁾	535,70	1142,10	1588,70	2949,50
	P-07/08 ⁽²⁾	886,60	1242,20	1758,30	3515,20

⁽¹⁾ Safras obtidas em Castro; ⁽²⁾ Safra obtida em Ponta Grossa.

Os valores do parâmetro “a” da maioria dos modelos calibrados (Tabela 4) ficaram próximos da biomassa seca final da cultura do milho. Nos modelos do tipo sigmoidal, o parâmetro “a” indica, aproximadamente, o ponto máximo atingido pela variável dependente. Houve a necessidade de condicionar alguns parâmetros, de alguns modelos e variáveis, restringindo os limites máximos, pois no processo de calibração sem restrição os valores de “a” se tornavam muito altos e inconsistentes. Os limites máximos impostos como restrição foram valores um pouco superiores à biomassa seca acumulada no estágio final de cada safra do milho.

O parâmetro “b” dos modelos Streibig (1988) e Gompertz e Philos (1825) apresentaram valores próximos, exceto na safra “Castro 06/07”. No modelo Ratkowsky (1983) os valores de “b” foram superiores aos demais, com maior amplitude, sendo o menor e maior valor igual a 100,0 e 869,49, respectivamente. Observou-se também que houve restrição do parâmetro na safra “Castro 06/07”, para todas as variáveis testadas.

Tabela 4. Calibração dos parâmetros de três modelos para estimativa da produtividade de biomassa seca no estágio final de quatro safras da cultura do milho, na região dos Campos Gerais, com as variáveis de entrada: dias após o plantio (*DAP*); graus dia acumulado (*GDA*); e, radiação solar incidente acumulada (*Rs*).

Safr	----- Modelo logístico não linear ----- (Streibig. 1988)				----- Modelo não linear ----- (Gompertz e Philos 1825)				----- Modelo não linear ----- (Ratkowsky,1983)			
	<i>a</i> (kg ha ⁻¹)	<i>b</i> (ad.)	<i>c</i> ⁽⁵⁾	<i>R</i> ² (ad.)	<i>a</i> (kg ha ⁻¹)	<i>b</i> (ad.)	<i>c</i> ⁽⁵⁾	<i>R</i> ² (ad.)	<i>a</i> (kg ha ⁻¹)	<i>b</i> (ad.)	<i>c</i> ⁽⁵⁾	<i>R</i> ² (ad.)
----- Dias após o plantio (<i>DAP</i>) -----												
C-06/07 ⁽¹⁾	3966,36	-73,72	68,99	0,86	3938,47	100,00 ⁽³⁾	0,07	0,62	3977,15	100,00 ⁽³⁾	0,40	0,38
C-07/08a ⁽¹⁾	18079,97	-5,92	93,78	1,00	18005,26	40,41	0,04	1,00	17663,01	869,49	0,07	1,00
C-07/08b ⁽¹⁾	14473,34	-5,87	78,01	1,00	14384,63	43,65	0,05	1,00	14271,70	611,16	0,08	1,00
P-07/08 ⁽²⁾	21368,41	-4,83	86,62	1,00	21182,57	18,62	0,04	1,00	20710,11	412,12	0,07	1,00
Média ⁽⁴⁾	14471,58	-28,16	83,13	—	14375,43	53,01	0,05	—	14116,76	460,54	0,18	—
----- Graus dia acumulados (<i>GDA</i>) -----												
C-06/07 ⁽¹⁾	3967,26	-44,90	687,89	0,86	3977,73	100,00 ⁽³⁾	0,01	0,67	3831,52	100,00 ⁽³⁾	0,01	0,63
C-07/08a ⁽¹⁾	18232,79	-5,49	994,92	1,00	18127,77	30,36	0,00	1,00	17679,97	604,04	0,01	1,00
C-07/08b ⁽¹⁾	14482,45	-5,79	824,95	1,00	14391,23	41,03	0,00	1,00	14270,00	581,20	0,01	1,00
P-07/08 ⁽²⁾	21406,55	-4,77	997,80	1,00	21205,12	18,04	0,00	1,00	20713,12	389,07	0,01	1,00
Média ⁽⁴⁾	14535,53	-18,39	893,54	—	14436,87	49,47	0,00	—	14074,87	364,37	0,01	—
----- Radiação solar incidente acumulada (<i>Rs</i>) -----												
C-06/07 ⁽¹⁾	3966,27	-53,78	1370,46	0,86	3952,82	100,00 ⁽³⁾	0,00	0,63	3799,52	100,00 ⁽³⁾	0,00	0,60
C-07/08a ⁽¹⁾	18557,33	-5,29	1800,46	1,00	18409,97	27,92	0,00	1,00	17772,04	472,59	0,00	1,00
C-07/08b ⁽¹⁾	14669,50	-5,00	1446,49	1,00	14495,79	24,53	0,00	1,00	14296,56	264,67	0,00	1,00
P-07/08 ⁽²⁾	21820,50	-4,39	1814,89	1,00	21529,36	14,46	0,00	1,00	20759,23	270,74	0,00	1,00
Média ⁽⁴⁾	14781,37	-21,15	1661,94	—	14630,72	47,46	0,00	—	14110,26	281,11	0,00	—

⁽¹⁾ Safras obtidas em Castro; ⁽²⁾ Safra obtida em Ponta Grossa; ⁽³⁾ Valores condicionados a restrição de limite máximo na calibração; ⁽⁴⁾ Médias obtidas nas safras de calibração: “Castro 2006/2007”, “Castro 2007/2008 1” e “Ponta Grossa 2007/2008”; ⁽⁵⁾ Mesma unidade da variável independente.

No modelo Streibig (1988), os valores do parâmetro “*c*” alteraram entre as variáveis, porém ficaram próximos entre as safras (Tabela 4). Os valores do parâmetro “*c*” são influenciados pela escala de cada variável, sendo que nos modelos Gompertz e Philos (1825) e Ratkowsky (1983) são muito pequenos, todos abaixo de 0,1.

Os parâmetros ajustados na calibração para todos os modelos na safra “Castro 06/07” foram diferentes dos demais (Tabela 4). A biomassa seca entre o estágio pleno florescimento e maturação fisiológica decaiu, ao invés de aumentar (Tabela 3).

As cultivares de ciclo precoce utilizadas no presente estudo apresentam ciclo médio entre 120 e 130 dias. O menor ciclo ocorreu na safra “Castro 06/07” (146 dias; Tabela 3), concordando com as características técnicas da cultivar. Para cada estágio fenológico do milho, unidades calóricas são necessárias para o seu desenvolvimento. Com isso, elevadas temperaturas podem acelerar o ciclo da planta devido ao acúmulo de graus dia (Maldaner et al., 2014). O resultado do ajuste dos modelos testados para os graus dia acumulados (*GDA*), para a cultura do milho (Tabela 4) não foram satisfatórios na safra “Castro 06/07”. Para as cultivares de ciclo precoce, foram necessários entre 831 e 890 graus dia acumulados para atingir a polinização (Fancelli e Dourado-Neto, 2000). Na Tabela 3, no estágio pleno florescimento, o menor valor de graus dia acumulados foi 878,75 °C, não sendo o fator que limitou a polinização. Além disso, a produção de biomassa seca da cultura do milho está diretamente relacionada com a radiação solar, convertendo-a em energia química na fotossíntese. Tal processo é relevante fisiologicamente na planta. Em anos com menor incidência solar e temperaturas mais baixas, há redução na produtividade (Maldaner et al., 2014).

Entre todos os modelos e variáveis analisadas, o modelo Ratkowsky (1983) obteve desempenho “mau” para a variável dias após o plantio. Os demais modelos tiveram desempenho “ótimo” (Tabela 5).

Tabela 5. Erros absoluto (*Ea*) e relativo (*Er*), coeficiente de correlação (*r*), índices “*d*” e “*c*”, e desempenho, entre a biomassa seca observada e estimada com os modelos analisados nos quatro estágios fenológicos para a cultura do milho, na safra castro 2007/2008b.

Modelo	<i>Ea</i> (kg ha ⁻¹)	<i>Er</i> (%)	<i>R</i> ------(adimensional)-----	“ <i>d</i> ”	“ <i>c</i> ”	Desempenho
----- <i>DAP</i> -----						
Streibig (1988)	1075,6	18,0	0,98	0,98	0,95	“Ótimo”
Gompertz e Philos (1825)	839,3	14,2	0,99	0,99	0,98	“Ótimo”
Ratkowsky (1983)	5846,6	46,7	0,70	0,60	0,42	“Mau”
----- <i>GDA</i> -----						
Streibig (1988)	1301,1	23,3	0,98	0,97	0,95	“Ótimo”
Gompertz e Philos (1825)	857,5	14,6	0,99	0,99	0,98	“Ótimo”
Ratkowsky (1983)	776,0	12,8	0,99	0,99	0,98	“Ótimo”
----- <i>Rs</i> -----						
Streibig (1988)	2285,5	48,4	0,93	0,93	0,87	“Ótimo”
Gompertz e Philos (1825)	1551,8	29,9	0,97	0,96	0,93	“Ótimo”
Ratkowsky (1983)	1054,1	18,5	0,98	0,98	0,96	“Ótimo”

CONCLUSÕES

- Safras de milho que tiveram maior *GDA*, *DAP* e *Rs* para atingir o estágio de maturação fisiológica foram as que obtiveram maior produtividade final de biomassa seca.
- A associação entre acúmulo da biomassa seca das culturas e variáveis testadas foi satisfatória na calibração.
- Com exceção do desempenho do modelo Ratkowsky para os dias após o plantio (“mau”), as demais variáveis apresentaram desempenho promissor para a cultura do milho (predominantemente “ótimo”).
- Mesmo com bons ajustes na calibração para o milho, a validação indicou altos erros absolutos e relativos nas safras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, E. C. de; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Modelo de regressão espacial para estimativa da produtividade da soja associada a variáveis agrometeorológicas na região oeste do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 34, n. 2, p. 286-299, 2014.
- CHUKWUJINDU, N. S. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 955-995, 2017.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária / Fundação ABC. **Mapa do levantamento semi-detalhado de solos**: Município de Castro. Elaborado por: FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P.; BOGNOLA, I. A.; POTER, R. O., 2001.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Produção de milho. **Guaíba: Agropecuária**, 2000. 360p.
- GOMPERTZ, B.; PHILOS, T. **Roy Soc London**. 115-513. 1825.
- JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1295-1306. 2012.
- JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; CARPENA, R. M.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELERK, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.
- MALDANER, L. J.; HORING, K.; SCHNEIDER, J. F.; FRIGO, J. P.; AZEVEDO, K. D. DE; GRZESIUCK, A. E. Exigência agroclimática da cultura do milho (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 13-23, 2014.

PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. **Dinâmica do Crescimento Vegetal**. Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2004.

RATKOWSKY, D. A. Nonlinear regression modeling: a unified practical approach. **Marcel Dekker**, New York, 1983.

SCOLARI, D. D. G. **Produção agrícola mundial: o potencial do Brasil**. In: VISÃO PROGRESSISTA DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO. Brasília, DF: Fundação Milton Campos, 2006. p. 9-86.

SOUZA, J. L. M. **Fundamentos de matemática e estatística para formulação de modelos e análise de dados**: aplicado às ciências agrárias. Curitiba: Plataforma Moretti/DSEA/SCA/UFPR, 2018. (Série Didática).

STREIBIG, J. C. Herbicide bioassay. **Weed Res.**, v. 28, n. 6, p. 479-484, 1988.