

Crescimento e produtividade do milho, submetido a doses de nitrogênio nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas¹

Guilherme Bastos Lyra¹, Adolpho Emanuel Quintela da Rocha², Gustavo Bastos Lyra³,
José Leonaldo de Souza⁴, Iedo Teodoro⁵

<http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461040019>

RESUMO

Este trabalho objetivou avaliar o crescimento e a produtividade de grãos da cultura do milho, submetida a diferentes doses de nitrogênio. O experimento foi conduzido com a cultura do milho híbrido Pioneer 30F35, no período de 25/06 a 28/10/2009, na região de Rio Largo, AL. O delineamento experimental foi em blocos casualizados e os tratamentos consistiram em seis doses de nitrogênio (0, 50, 100, 150, 200 e 250 kg ha⁻¹ de N), com a fonte ureia, e cinco repetições. Os modelos logístico e pico log normal apresentaram ajustes estatísticos significativos ($p < 0,05$) das variáveis de crescimento e coeficientes de determinação máximo de 0,994 e 0,990, respectivamente. Os valores observados e estimados pelos modelos apresentaram alta associação pelo índice de concordância de Willmott, com valores superiores a 0,953. As plantas apresentaram diferenças estatísticas significativas pelo teste F ($p < 0,05$), entre os tratamentos, para altura e índice de área foliar, com crescimento máximo para a dose de 100 kg ha⁻¹ de N. Os tratamentos mostraram diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) para a produtividade, sobressaindo-se a dose de 200 kg ha⁻¹, que proporcionou maior produtividade de grãos (5,45 t ha⁻¹). Os modelos de crescimento podem ser utilizados para auxiliar a análise de crescimento.

Palavras-chave: graus-dia, altura do dossel, índice de área foliar, *Zea mays* L.

ABSTRACT

Maize growth and yield under nitrogen levels in Coastal Plains of Alagoas, Brazil

The objective of this work was to evaluate the growth and yield of maize subjected to different nitrogen rates. The experiment was conducted with maize cultivar Pioneer 30F35 from 25/06 to 28/10/2009, in the region of Rio Largo-AL. The experiment was arranged in a randomized block design, with six nitrogen rates (0, 50, 100, 150, 200 and 250 kg ha⁻¹ of N in the form of urea) and five repetitions per treatment. The models logistic and log normal peak showed statistically significant adjustments ($p < 0.05$) and maximum coefficient of determination of 0.994 and 0.990, respectively. The values observed and estimated by these models showed high association by the Willmott's index of agreement, with values greater than 0.953. The plants showed *statistically significant differences by the F teste* ($p < 0.05$) between the treatments for height (h) and leaf area index (LAI), with a maximum growth corresponding to the rate of 100 kg ha⁻¹ N. The treatments showed *significant* differences ($p < 0.05$) for yield, with the rate of 200 kg ha⁻¹ providing the highest yield (5.45 t ha⁻¹). The growth models can assist the growth analysis.

Key words: degree-days, sward height, leaf area index, *Zea mays* L.

Recebido para publicação em 09/08/2012 e aprovado em 25/10/2013.

¹ Engenheiro-Agrônomo, Doutor. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, BR 104, Km 85, s/n, 57.100-000, Rio Largo, Alagoas, Brasil. gbastoslyra@gmail.com

² Engenheiro-Agrônomo, Doutor. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, BR 104, Km 85, s/n, 57.100-000, Rio Largo, Alagoas, Brasil. adolphoquintela@hotmail.com

³ Meteorologista, Doutor. Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rodovia BR 465, Km 7, Campus Universitário, 23851-970, Seropédica, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. gblyra@gmail.com

⁴ Meteorologista, Doutor. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, BR 104, Km 85, s/n, 57.100-000, Rio Largo, Alagoas, Brasil. leonaldojs@yahoo.com.br

⁵ Engenheiro-Agrônomo, Doutor. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, BR 104, Km 85, s/n, 57.100-000, Rio Largo, Alagoas, Brasil. iedoteodoro@ig.com.br

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas de maior importância socioeconômica no mundo, sendo cultivado numa área de aproximadamente 170 milhões de hectares, superada apenas pela do trigo. O Brasil é o terceiro maior produtor, com aproximadamente 69 milhões de toneladas de grãos na safra 2011/2012. Entretanto, a produtividade nacional é baixa (4,2 t ha⁻¹), quando comparada com a dos Estados Unidos da América (9,2 t ha⁻¹), maior produtor mundial, com cerca de 313 milhões de toneladas de grãos no mesmo ano (FAO, 2013).

Dentre os nutrientes de maior exigência pela cultura do milho, o nitrogênio (N) é assimilado em maiores quantidades e é o que mais limita sua produtividade de grãos (Coelho, 2006). Além disso, esse nutriente está diretamente relacionado com o crescimento (França *et al.* 2011), visto que plantas deficientes de N podem apresentar redução de altura e menores áreas foliares e, assim, comprometer a fotossíntese, por menor interceptação da radiação solar. Assim, torna-se necessário avaliar doses de N que possibilitem a máxima produtividade física, como também o monitoramento do crescimento vegetal, quando se almeja altos rendimentos.

Este monitoramento do crescimento vegetal geralmente requer técnicas destrutivas e que demandam tempo, tornando-se inviáveis em grandes áreas agrícolas. Por isso, metodologias mais eficientes e que forneçam informações prévias a respeito do cultivo, como a utilização de modelos empíricos, semiempíricos e biológicos, são fundamentais (Lyra *et al.*, 2003; Lyra *et al.*, 2008). Esses modelos subsidiam diversas análises a partir de medidas biométricas, como altura de planta, matéria seca e índice de área foliar, em função dos dias após a semeadura ou do tempo térmico (graus-dia acumulados), que tem-se mostrado mais eficiente, uma vez que a duração dos subperíodos e ciclos da planta estão ligados a variações das condições ambientais e não ao número de dias (Lima & Silva *et al.*, 2008; Ritchie *et al.*, 2003).

Vários modelos para simular o crescimento biológico foram desenvolvidos, como por exemplo, os de Gompertz, Richards, Weibull, o expolinear e o logístico. Esse último destaca-se por seu ajuste, superior em relação aos dos outros, em diversas condições edafoclimáticas, culturas e práticas de cultivo (Tei *et al.*, 1996; Lyra *et al.*, 2008; Karadavut *et al.*, 2010). Os coeficientes desses modelos apresentam, na sua maioria, significado biológico, o que permite inferir sobre alterações do ambiente, práticas agrícolas, épocas de plantio, dentre outros fatores, no crescimento e desenvolvimento das culturas (Lyra *et al.*, 2003). Portanto, o ajuste desses modelos fornece informações para a tomada de decisão para o manejo mais adequado às culturas, de acordo com as condições edafoclimáticas.

De acordo com o exposto, este trabalho objetivou avaliar o crescimento e a produtividade de grãos da cultura do milho, submetida a diferentes doses de nitrogênio, com auxílio de modelos de crescimento semiempíricos.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de 25/06 a 28/10/2009, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, situado no município de Rio Largo, Alagoas (9° 29' 45" S, 35° 49' 54" O e altitude de 127m). O clima da região, pela classificação climática de Köppen, é "As", ou seja, tropical chuvoso, com verão seco e inverno chuvoso (Cruz *et al.*, 2008). O solo local foi classificado como Latossolo Amarelo coeso argissólico, de textura média/argilosa, com declividade inferior a 2% (Almeida *et al.*, 2008). Antes da implantação do experimento, realizou-se a amostragem do solo da área para análise dos seus atributos químicos (Tabela 1).

O milho híbrido (Pioneer 30F35) foi semeado em 25/06, no espaçamento de 0,90 m entre linhas, com duas sementes espaçadas a cada 0,20 m, em sistema de cultivo mínimo. Posteriormente (13/07), realizou-se o desbaste para uma planta. O controle de plantas nativas foi realizado antes da semeadura, com aplicação de herbicida e, durante o cultivo, por meio de duas capinas manuais. Foi realizado o controle das principais pragas do milho na região, as formigas e a lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*). A adubação de semeadura consistiu em 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅, tendo como fonte uma mistura de superfosfato simples e superfosfato triplo.

O delineamento estatístico experimental foi em blocos casualizados, com seis tratamentos 0 (N1), 50 (N2), 100 (N3), 150 (N4), 200 (N5) e 250 (N6) kg ha⁻¹ de N e cinco repetições. No mesmo dia em que foram aplicados os tratamentos (24/07), adubou-se também com 90 kg ha⁻¹ de K₂O. As fontes destes nutrientes foram a ureia (N) e o cloreto de potássio (K₂O). Ainda durante o ciclo, realizou-se semanalmente aplicação foliar de uma mistura de micronutrientes à base de zinco, cobre e manganês (2,8 g L⁻¹). Cada parcela do experimento foi composta por cinco linhas de cinco metros, o que totalizou 22,5m² e 55.555 plantas por hectare. Consideraram-se como área útil apenas as três linhas centrais de cada parcela, sendo desprezado meio metro de bordadura em cada extremidade.

A partir de 31/07 foram realizadas medições semanais de altura de planta, comprimento e largura foliar e contabilizado o número de folhas verdes expandidas. Em cada medição, tomaram-se como amostra três plantas por parcela, para análise do crescimento da cultura, em função dos graus-dia acumulados, que foram determinados, utilizando-se a seguinte equação:

$$\Sigma GD = \sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_b) \quad (1)$$

em que: “GD (°C dia⁻¹) representa os graus-dia acumulados; T_m (°C) é a temperatura média diária do ar do dia i, com i variando de 1 (data de semeadura), até n dias (dias considerados) e T_b (°C) é a temperatura basal, para a qual adotou-se 10 °C (Villa Nova *et al.*, 1972). T_m foi determinada pelos extremos diários de temperatura do ar, pela relação (T_x + T_n)/2, em que T_x (°C) é a temperatura do ar máxima e T_n (°C), a mínima diária.

O modelo logístico foi ajustado à variável dependente altura de planta, em função dos graus-dia acumulados (ΣGD) (Tei *et al.*, 1996):

$$w = \frac{w_f}{1 + \left(\frac{w_f}{w_o} - 1 \right) \exp(-r \Sigma GD)} \quad (2)$$

em que: w (cm) é a variável de crescimento (altura); ΣGD (°C dia⁻¹) representa os graus-dia acumulados; w_o e w_f (cm) correspondem ao crescimento inicial e final do ciclo da cultura, respectivamente, e r (cm cm⁻¹ °C⁻¹ dia⁻¹) é a taxa máxima de crescimento relativo.

A área foliar foi determinada conforme Herman & Câmara (1999), sendo posteriormente calculado o IAF, pela relação da área de todas as folhas de cada planta dividida pela área ocupada pela planta. A área ocupada por planta foi determinada em função do espaçamento entre plantas. Ajustou-se o modelo pico log normal para a estimativa dos valores de IAF em função dos graus-dia acumulados, conforme o modelo a seguir:

$$IAF = a \exp \left(-0,5 \left(\ln \left[\left(\frac{\Sigma GD}{X_o} \right) / b \right] \right)^2 \right) \quad (3)$$

em que: a, b e x_o são coeficientes de ajuste da equação e ΣGD são os graus-dia acumulados (°C dia⁻¹).

No monitoramento do armazenamento de água no solo (ARM, mm), calculado diariamente, foi utilizado o balanço hídrico sequencial (BH) do solo, desenvolvido por Thornthwaite & Matter (1955) e adaptado por Lyra *et al.* (2010) para culturas agrícolas. As simulações do balanço hídrico foram iniciadas a partir da data de emergência até o final do ciclo. A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi determinada pelo método do coeficiente da cultura único (K_c),

proposto no boletim FAO56, com a evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo modelo de Penman-Monteith parametrizado para uma cultura hipotética (Allen *et al.*, 1998). Os coeficientes da cultura foram ajustados previamente às condições edafoclimáticas médias locais e da cultura (K_c inicial – 0,95, intermediária – 1,2, final – 0,6) (Allen *et al.*, 1998; Lyra *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2009). Nas análises do BH, a capacidade de água disponível [CAD = 1000 (θ_{cc} - θ_{pm}) z] foi determinada para cada fase de desenvolvimento do milho (inicial – 20 dias, crescimento – 35 dias, intermediária – 40 dias e final – 30 dias), em função da profundidade efetiva do sistema radicular. Os valores da umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc} = 0,255 m³ m⁻³) e no ponto de murcha (θ_{pm} = 0,153 m³ m⁻³) foram determinados em laboratório, pela curva de retenção de água no solo. A água facilmente disponível (AFD) foi calculada como AFD = f CAD, em que f é o fator de disponibilidade de água, considerado igual a 0,55, e a profundidade efetiva do sistema radicular (z, m), variando de 0,10 a 0,60 m, entre a emergência e a fase de senescência, respectivamente (Ritchie *et al.*, 2003). A profundidade do sistema radicular foi interpolada para todo o ciclo da cultura, em função da variação dos K_c nas fases inicial e de crescimento como sugerido por Allen *et al.* (1998).

A colheita foi realizada em 28/10, apenas na área útil de cada parcela. As espigas foram identificadas por tratamento, para determinação das produtividades. Para determinação da dose de N de máxima eficiência física (MEF), ajustou-se o modelo polinomial de segundo grau à produtividade. A dose de MEF foi obtida a partir da primeira derivada do polinômio ajustado.

Os ajustes dos modelos de crescimento e polinomial foram avaliados por meio do coeficiente de determinação (R²). As taxas de crescimento máximo relativo, observadas (r_{obs}), foram analisadas a partir da aplicação dos tratamentos, que ocorreram na adubação de cobertura, o que impossibilitou a comparação com as estimadas entre os tratamentos, visto que durante o crescimento inicial as doses de nitrogênio ainda não haviam sido distribuídas nas parcelas. A determinação das taxas foi baseada na metodologia utilizada por Lyra *et al.* (2003). Na avaliação dos dados estimados pelos modelos, utilizou-se o erro padrão da estimativa (EPE), que fornece o desvio médio entre os valores observados e estimados. Na aproximação entre os dados observados e os estimados, aplicou-se o índice de concordância (d), proposto por

Tabela 1. Atributos químicos do solo antes da implantação do experimento

pH	P*	K	Na	Ca + Mg	H + Al	SB	T	m	V
H ₂ O		mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			g kg ⁻¹	%
6,28	16,10	85,00	16,00	5,00	2,00	5,29	7,29	2,76	72,55

*Mehlich

Willmott (1981), que varia de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1 maior a concordância entre os dados observados e os estimados. Os dados estimados pelos modelos também foram avaliados por meio do teste de Student (t) e pela análise de regressão linear simples ($Y = \beta X$), entre os valores observados (X) e estimado (Y), em que as hipóteses testadas foram: $H_0: \beta = 1$ e $H: \beta \neq 1$, para $Y = X$. Na avaliação da altura de planta e IAF, em função dos tratamentos, os dados foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) (Teste F).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período experimental, a temperatura do ar média foi de 24,2 °C, com extremos médios de 22,1 e 28,4 °C (Figura 1A). Essas condições térmicas encontravam-se na faixa ideal para a cultura do milho, visto que, para o seu adequado crescimento, a faixa de temperatura do ar considerada ótima situa-se entre 21 e 30 °C (Muchow, 1990). As temperaturas do ar médias e extremas (máxima e mínima) apresentaram baixa amplitude do início do ciclo até meados de setembro. A partir dessa data, a tendência foi de aumento da temperatura, condicionado pela forçante solar, por causa da transição da estação do inverno para a primavera. A evapotranspiração da cultura, acumulada no ciclo, foi de 463 mm, com média de 3,7 mm d⁻¹ e máxima de 6 mm d⁻¹, que ocorreu entre 01/09 e 07/10, e coincidiu com o período de aumento da temperatura do ar (Figura 1B).

A precipitação pluvial total do período de cultivo foi de 574 mm, com 88 dias de chuva (70% do ciclo), ou seja, média por evento de chuva de 6,5 mm d⁻¹ e frequência de aproximadamente dois eventos a cada três dias (Figura 2). O evento máximo de chuva no período foi de 52 mm d⁻¹ (01/07). Nos dias 10 e 14 de setembro, aplicou-se irrigação de 24 mm, em cada dia. Mesmo com as irrigações, a cultura sofreu estresse hídrico, aproximadamente a partir de 1.300 ΣGD. O estresse ocorreu por causa das precipitações inferiores a 3 mm a partir dos 1.125 ΣGD, tendo como consequência o início da redução do armazenamento de água (ARM). Esse período coincide com a transição do período seco para o úmido da região. Durante o ciclo da cultura, o ARM foi superior à água facilmente disponível (AFD), até o estágio de grãos pastosos (1.256 "GD), a partir daí, o ARM foi inferior à AFD necessária para a secagem dos grãos na fase de grãos secos (Figura 2).

De acordo com os resultados obtidos, os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas significativas pelo teste F ($p < 0,05$) para a variável de crescimento altura de planta. O tratamento N3 apresentou maior altura final observada (201,0 cm) (Figura 3C), enquanto a menor foi proporcionada pelo tratamento N1 (173,1 cm) (Figura 3A). A diferença entre a altura da planta dos tratamentos N1 e N3 foi de 14%.

Estes resultados estão em concordância com os relatados por Oliveira *et al.* (2009), que observaram que a

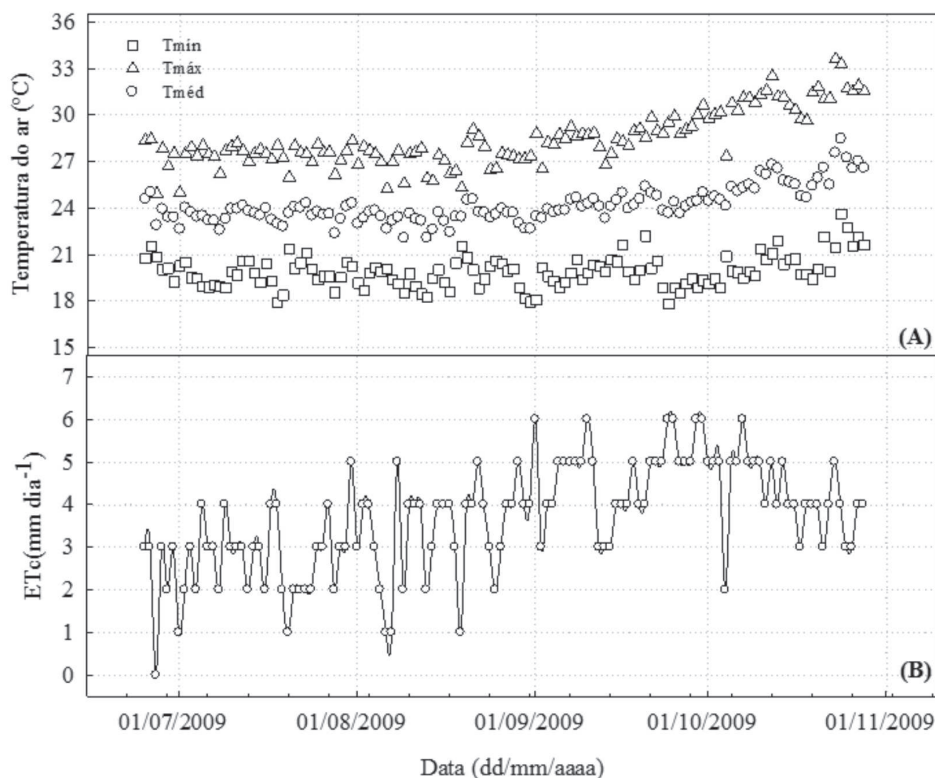


Figura 1. Variação da temperatura do ar máxima, mínima e média (°C) (A) e da evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹) (B), na região de Rio Largo-AL, durante o ciclo da cultura do milho.

dose de 100 kg ha⁻¹ de N proporcionou altura máxima de planta (146,3 cm) para o milho cv. BR 5033. Cruz *et al.* (2008) avaliaram adubação nitrogenada da cultura do milho em vários genótipos, na mesma região deste estudo, e também obtiveram resultados semelhantes, uma vez que doses de N acima de 90 kg ha⁻¹ não contribuíram para o aumento de altura da planta. Ou seja, resultados similares

aos obtidos para o híbrido Pioneer 30F35, neste trabalho. Em estudos realizados por Amanullah *et al.* (2009) com a variedade Azam, no Paquistão, pôde-se observar que doses crescentes de N, entre 60 e 180 kg ha⁻¹, proporcionaram alturas de planta similares, com diferenças de no máximo 5%. Assim, deve-se salientar que a dose ótima para a variável em questão está diretamente relacionada com o

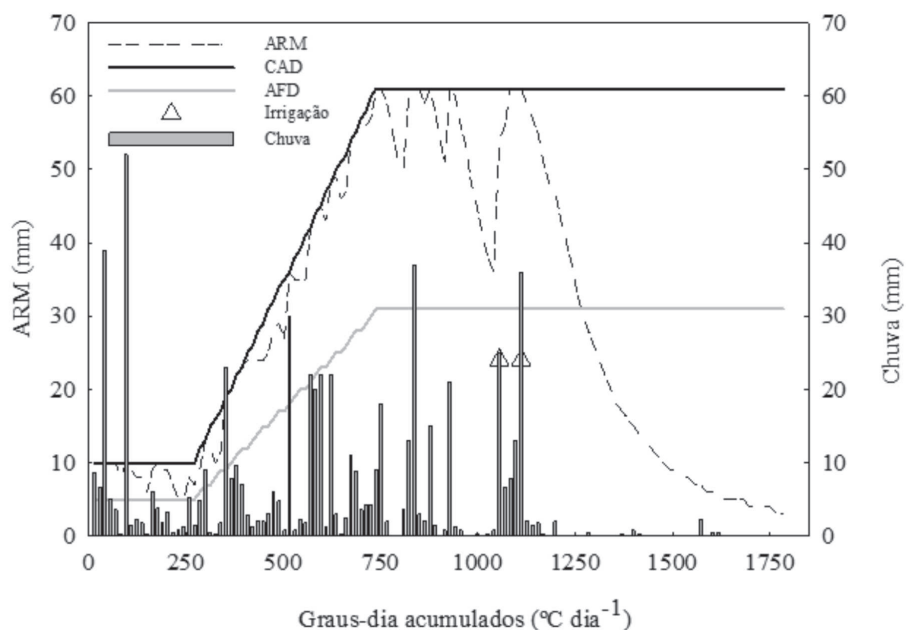


Figura 2. Variação do armazenamento de água no solo (ARM, mm), chuva e irrigação durante o ciclo do milho, em função dos graus-dia acumulados (GD, °C). Capacidade de Água Disponível (CAD, mm) e Água Facilmente Disponível (AFD, mm), na região de Rio Largo-AL, durante o ciclo da cultura do milho.

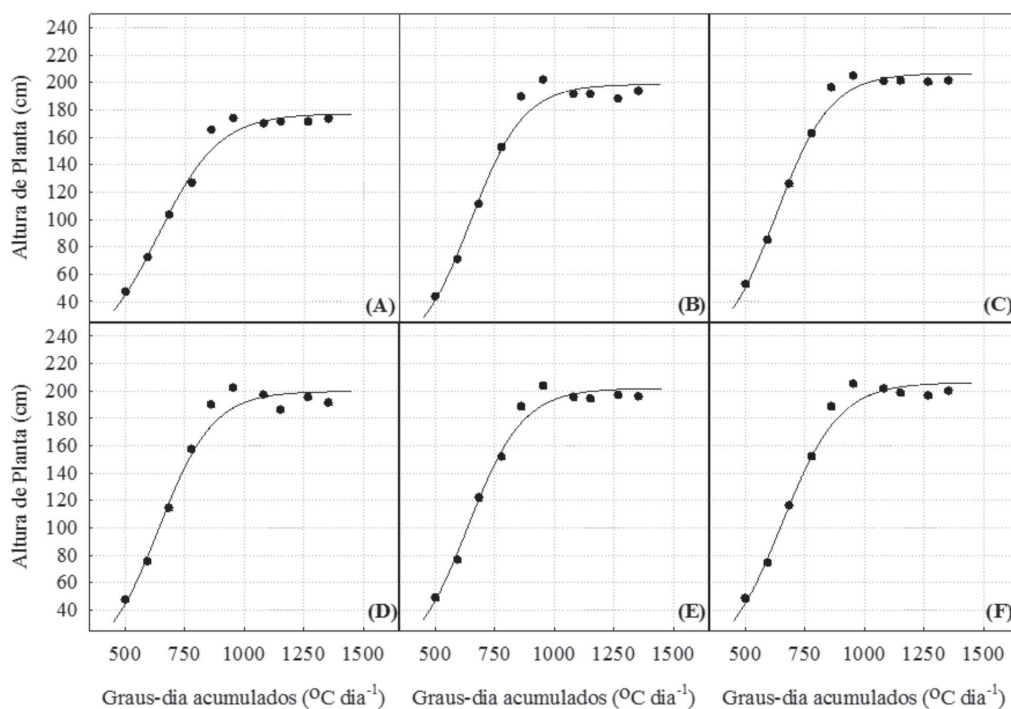


Figura 3. Valores observados da altura de planta (cm) para o milho, híbrido Pioneer 30F35, e curvas ajustadas pelo modelo logístico, para as doses 0 (A), 50 (B), 100 (C), 150 (D), 200 (E) e 250 kg ha⁻¹ de N (F), em função dos graus-dia acumulados (GD, °C dia⁻¹).

genótipo utilizado e com as condições edafoclimáticas, que, juntamente, com a suficiência nutricional podem contribuir para que a cultura expresse seu máximo potencial.

O ajuste do modelo logístico da altura da planta apresentou R^2 entre 0,989 e 0,994, o que indicou que o modelo explica a maior parte da variabilidade da altura de planta. Os coeficientes do modelo ajustados (w_f , w_0 e r) foram estatisticamente significativos pelo teste t ($p < 0,01$) (Tabela 2). Andrade Neto *et al.* (2010) também ajustaram o modelo logístico, entretanto, na cultura do sorgo, obtiveram coeficientes entre 0,91 e 0,99, para a mesma variável.

Analogamente ao observado, as maiores e menores alturas finais estimadas foram proporcionadas pelos tratamentos N3 (206,4 cm) e N1 (177,2 cm), respectivamente (Tabela 2), e diferiram no máximo em 2,4%, em relação aos valores observados. O tratamento N6, no entanto, apresentou altura final estimada (206,2 cm) próxima à proporcionada pelo N3.

A partir da aplicação das doses de N (tratamentos), a menor taxa de crescimento máximo relativo observada foi proporcionada pelo tratamento N1 (0,0046 $\text{cm cm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e, a maior, pelos tratamentos N2, N3 e N5 (0,0052 $\text{cm cm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Esse resultado indicou que as plantas sem adubação nitrogenada apresentaram menor taxa de crescimento relativo máximo. Com relação às plantas que receberam nitrogênio, a menor taxa foi proporcionada pelo tratamento N6 (0,0049 $\text{cm cm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), possivelmente, em virtude do efeito do excesso desse nutriente.

As alturas de planta observadas não diferiram das estimadas por meio do modelo pelo teste t de Student ($p < 0,01$). Os dados estimados apresentaram concordância elevada com os observados, pelos índices de concordância de Willmott (d), que foram superiores a 0,994. Com exceção do tratamento N5, o modelo subestimou os valores observados entre 0,2 (N1 e N3) e 10% (N2) e o EPE variou entre $\pm 6,2$ cm (N3) e $\pm 8,8$ cm (N4) (Tabela 3).

Os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas significativas pelo teste F ($p < 0,05$) para a variável IAF, que alcançou valor máximo observado de 4,74, proporcionado pelo tratamento N3 (Figura 4C). Esse tratamento

superou o tratamento N1 (2,69) em 43% (Figura 4A) e apresentou valores superiores de IAF, em relação aos demais tratamentos praticamente em todas as medições, com exceção dos verificados aos 1.084 ΣGD , em que os valores de IAF começaram a decair por causa da senescência das folhas (Figura 4).

Os valores de IAF estimados pelo modelo pico log normal mostraram R^2 variando de 0,835 a 0,990, inferiores ao observado pelo modelo logístico para altura de planta. Os coeficientes de ajuste da equação (a , b e x_0) apresentaram ajuste significativo ($p < 0,01$) (Tabela 4).

As plantas atingiram IAF máximo observado aos 863 ΣGD . Os maiores e menores valores de IAF máximos estimados (4,47 e 2,49) foram proporcionados pelos mesmos tratamentos que apresentaram os máximos observados (N3 e N1); entretanto, ocorreram aos 956 ΣGD e foram 5,5 e 7,5% menores que o valor observado, respectivamente. Estes valores foram semelhantes aos relatados por Kunz *et al.* (2007), em que o IAF máximo foi de 5,3 aos 1.086 ΣGD , em condições irrigadas.

Os valores de IAF observados não diferiram dos estimados pelo modelo, de acordo com o teste t de Student ($p < 0,01$). Os dados observados e estimados demonstraram elevada concordância, com índice de Willmott, entre 0,953 e 0,977. Conforme os coeficientes angulares (0,971 e 0,998),

Tabela 3. Valores do índice de concordância de Willmott (d), coeficiente angular da reta (β_1) e erro padrão da estimativa (EPE) para as estimativas da altura da planta pelo modelo logístico de crescimento em função dos graus-dia acumulados ($^\circ\text{C dia}^{-1}$)

Dose de N (kg ha ⁻¹)	Graus-dia acumulados		
	Parâmetros		
	d	β_1	EPE
0	0,995	0,998 ^{ns}	$\pm 6,723$
50	0,994	0,904 ^{ns}	$\pm 8,766$
100	0,997	0,998 ^{ns}	$\pm 6,208$
150	0,994	0,996 ^{ns}	$\pm 8,785$
200	0,996	1,000 ^{ns}	$\pm 7,242$
250	0,996	0,996 ^{ns}	$\pm 7,580$

^{ns} não-significativo a $p < 0,05$ pelo teste t

Tabela 2. Valores estimados dos parâmetros do modelo logístico para altura da planta em função dos graus-dia acumulados ($^\circ\text{C dia}^{-1}$) e coeficientes de determinação da regressão. Valores entre parênteses representam o erro padrão da estimativa.

Dose de N (kg ha ⁻¹)	Graus-dia acumulados			
	Parâmetros			
	w_f	w_0	r	R^2
0	177,2**($\pm 4,75$)	1,2*($\pm 0,41$)	0,0078**($\pm 0,0006$)	0,990
50	198,6**($\pm 5,92$)	0,6*($\pm 0,23$)	0,0090**($\pm 0,0007$)	0,990
100	206,4**($\pm 4,06$)	0,8*($\pm 0,24$)	0,0088**($\pm 0,0005$)	0,994
150	199,7**($\pm 5,90$)	0,7*($\pm 0,29$)	0,0088**($\pm 0,0007$)	0,989
200	201,9**($\pm 5,14$)	0,8*($\pm 0,27$)	0,0087**($\pm 0,0006$)	0,992
250	206,2**($\pm 5,60$)	0,9*($\pm 0,31$)	0,0083**($\pm 0,0006$)	0,992

** significativo a $p < 0,01$; * significativo a $p < 0,05$ pelo teste t

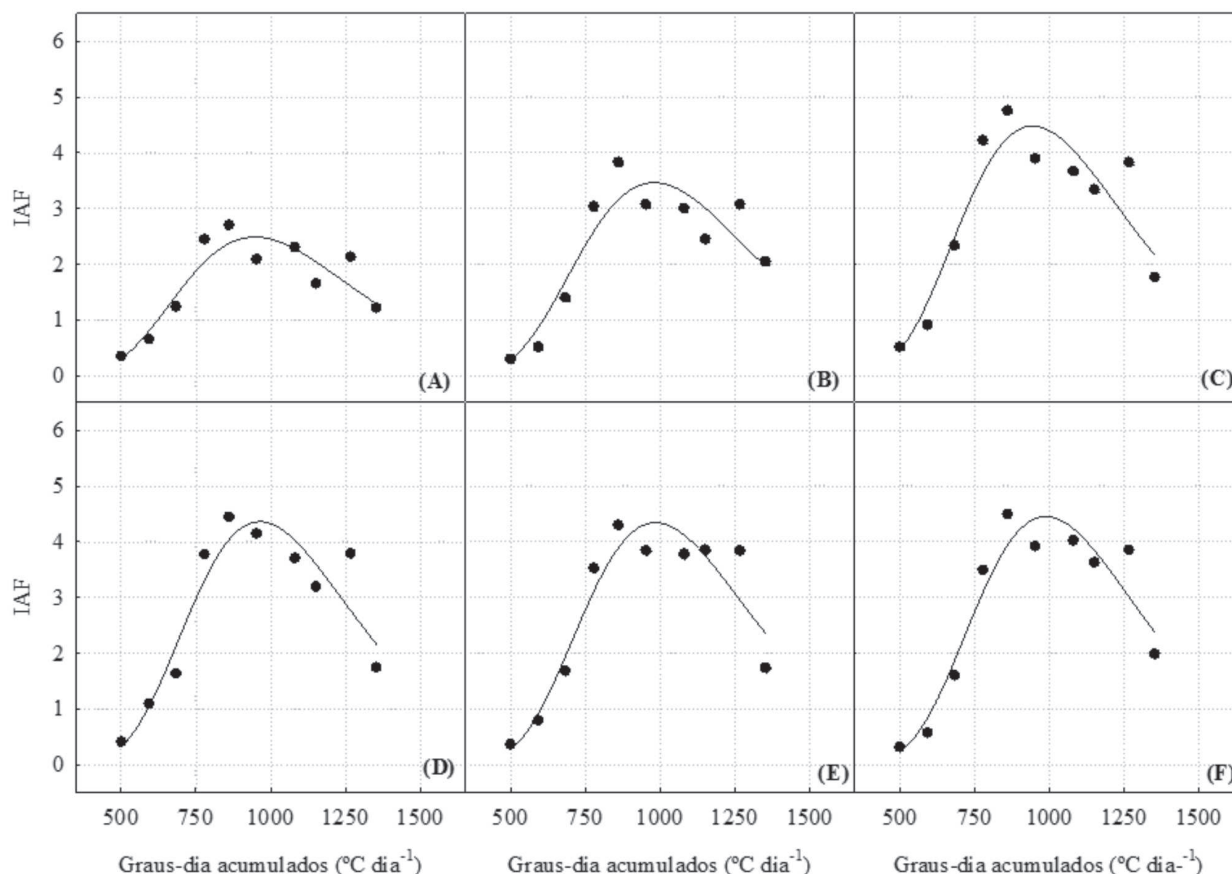


Figura 4. Valores observados do índice de área foliar (IAF) para o milho, híbrido Pioneer 30F35, para as doses 0 (A), 50 (B), 100 (C), 150 (D), 200 (E) e 250 kg ha⁻¹ de N (F), e curvas ajustadas pelo modelo pico log normal, em função dos graus-dia acumulados (GD, °C dia⁻¹).

Tabela 4. Valores estimados dos parâmetros do modelo pico log normal para o IAF em função dos graus-dia acumulados (°C dia⁻¹) e coeficientes de determinação da regressão. Valores entre parênteses representam o erro padrão da estimativa.

Dose de N (kg ha ⁻¹)	Graus-dia acumulados			
	Parâmetros			
	a	b	x ₀	R ²
0	2,5** (±0,2)	0,3** (±0,0394)	947,4** (±29,6)	0,835
50	3,5** (±0,3)	0,3** (±0,0402)	980,1** (±31,1)	0,854
100	4,5** (±0,4)	0,3** (±0,0347)	945,4** (±26,5)	0,862
150	4,4** (±0,3)	0,3** (±0,0316)	963,7** (±24,5)	0,883
200	4,3** (±0,3)	0,3** (±0,0312)	985,3** (±24,4)	0,990
250	4,5** (±0,3)	0,3** (±0,0286)	989,4** (±22,5)	0,914

** significativo a $p < 0,01$; * significativo a $p < 0,05$ pelo teste t

o modelo subestimou os valores observados entre 0,2 e 2,9%. O EPE apresentou variação entre $\pm 0,30$ (N1) e $\pm 0,50$ (N3) (Tabela 5).

Com relação à produtividade, observaram-se diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste F ($p < 0,05$). A dose de 200 kg ha⁻¹ de N proporcionou a maior média, com 5,45 t ha⁻¹ de grãos (Figura 5), e superou a média nacional (4,2 t ha⁻¹) em aproximadamente 23%.

As plantas que não receberam adubação nitrogenada apresentaram menor produtividade média (2,38 t ha⁻¹), com

decréscimo de 56% em relação à das plantas que receberam a dose que proporcionou valor superior. A elevação das doses de N foi benéfica até 200 kg ha⁻¹; em seguida, a produtividade decaiu 8%. Esse decréscimo pode ser atribuído ao fato de que a eficiência das doses de N diminuiu em função de sua elevação, pois pode exceder as necessidades das culturas, além de perdas por amônia (Fernandes *et al.*, 2005).

O modelo de segunda ordem apresentou ajuste significativo ($p < 0,01$) à produtividade e seus coeficientes apre-

Tabela 5. Valores do índice de concordância de Willmott (d), coeficiente angular da reta (β_1) e erro padrão da estimativa (EPE) para o IAF estimado pelo modelo pico log normal em função dos graus-dia acumulados ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$)

Dose de N (kg ha ⁻¹)	Graus-dia acumulados		
	Parâmetros		
	d	β_1	EPE
0	0,953	0,972 ^{ns}	± 0,320
50	0,958	0,971 ^{ns}	± 0,452
100	0,961	0,998 ^{ns}	± 0,542
150	0,968	0,977 ^{ns}	± 0,491
200	0,973	0,980 ^{ns}	± 0,465
250	0,977	0,981 ^{ns}	± 0,449

^{ns} não-significativo a $p < 0,05$ pelo teste t

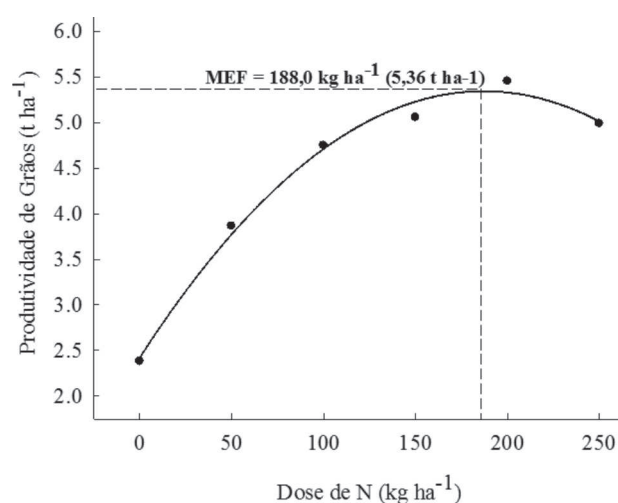


Figura 5. Produtividade de grãos em função de doses de nitrogênio.

sentaram significância pelo teste de Student (t) ($p < 0,01$). A dose de MEF estimada pelo modelo foi de 188 kg ha⁻¹ de N, para 5,36 t ha⁻¹ de grãos. Bastos *et al.* (2008) avaliaram doses crescentes de N no milho em duas regiões e também observaram efeito quadrático da produtividade, em Baixa Grande do Ribeiro-PI, em que a máxima produtividade estimada foi de 6,15 t ha⁻¹, proporcionada pela dose de 119,5 kg ha⁻¹. Entretanto, na região de São Raimundo das Mangabeiras-MA, essa variável apresentou efeito linear em relação às doses de N.

Apesar de ter apresentado maior IAF, o que proporcionaria maior taxa fotossintética, o tratamento N3 não apresentou maior produtividade. Segundo Oliveira *et al.* (2005), elevados valores de IAF tendem a promover autossombreamento, o que compromete a captação da radiação solar pelas folhas. Além disso, estudos realizados por Alves *et al.* (2001) revelaram que o aumento do índice de área foliar do milho promove maior interceptação da água pelo dossel. Assim, esses fatores podem ter influenciado no decréscimo da produtividade do tratamento N3.

CONCLUSÕES

A elevação das doses de nitrogênio contribuiu para o aumento da altura de planta e do índice de área foliar até a dose de 100 kg ha⁻¹ de N; em seguida, os valores decresceram; diferentemente da produtividade que aumenta até a dose de 200 kg ha⁻¹ de N, o que proporciona produtividade de 5,45 t ha⁻¹ de grãos.

Os modelos de crescimento utilizados apresentaram ajustes significativos para altura e índice de área foliar do milho e podem ser utilizados para auxiliar a análise de crescimento vegetal.

REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D & Smuth M (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Rome, FAO. 301p.
- Amanullah, Marwat KB, Shah P, Maula N & Arifullah S (2009) Nitrogen levels and its time of application influence leaf area, height and biomass of maize planted at low and high density. *Pakistan Journal of Botany*, 41:761-768.
- Almeida ACS, Souza JL, Teodoro I, Barbosa GVS, Moura Filho G & Ferreira Júnior RA (2008) Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciência e Agrotecnologia*, 32:1441-1448.
- Alves DRB, Frizzone Já & Dourado Neto D (2001) Repartição da lâmina de irrigação, aplicada via pivô central, na cultura do milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 5:67-70.
- Andrade Neto RC, Miranda NO, Duda GP, Góes GB & Lima AS (2010) Crescimento e produtividade do sorgo forrageiro BR 601 sob adubação verde. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14:124-130.
- Bastos EA, Cardoso MJ, Melo FB, Ribeiro VQ & Andrade Júnior AS (2008) Doses e formas de parcelamento de nitrogênio para a produção de milho sob plantio direto. *Revista Ciência Agrônômica*, 39:275-280.
- Coelho AM (2006) Nutrição e adubação do milho. Sete Lagoas, Embrapa-CNPMS. 10p. (Circular Técnica, 78).
- Cruz SCS, Pereira FRS, Santos JR, Albuquerque AW & Pereira RG (2008) Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12:62-68.
- FAO (2013) FAOSTAT online database. Disponível em: < <http://faostat3.fao.org/> >. Acessado em: 30 de junho de 2013.
- Fernandes FCS, Buzetti S, Arf O & Andrade JAC (2005) Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 4:195-204.
- França S, Mielniczuk J, Rosa LMG, Bergamaschi H & Bergonci JL (2011) Nitrogênio disponível ao milho: Crescimento, absorção e rendimento de grãos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15:1143-1151.
- Lima EP & Silva EL (2008) Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12:266-273.
- Herman ER & Câmara GMS (1999) Um método simples para estimar a área foliar da cana-de-açúcar. *STAB*, 17:01.

- Karadavut U, Palta C, Kökten K & Bakoglu A (2010) Comparative study on some non-linear growth models for describing leaf growth of maize. *International Journal of Agriculture & Biology*, 12:227-230.
- Kunz JH, Bergonci JI, Bergamaschi H, Dalmago GA, Heckler BMM & Comiran F (2007) Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42:1511-1520.
- Lyra GB, Lyra GB, Souza JL & Santos MA (2010) Balanço sequencial de água no solo para o manejo da irrigação de baixa frequência e alta intensidade na cana-de-açúcar. *STAB*, 28:22-25.
- Lyra GB, Souza JL, Lyra GB, Teodoro I & Moura Filho G (2008) Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 7:211-230.
- Lyra GB, Sedyama GC, Lyra GB, Pereira AR & Souza E (2007) Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura "único" padrão. *STAB*, 25:40-43.
- Lyra GB, Zolnier S, Costa LC, Sedyama GC & Sedyama MAN (2003) Modelos de crescimento para a alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa-de-vegetação. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 11:69-77.
- Muchow RC (1990) Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Research*, 23:145-158.
- Oliveira FA, Cavalcante LF, Silva IF, Pereira WE, Oliveira JC & Filho JFC (2009) Crescimento do milho adubado com nitrogênio e fósforo em um Latossolo Amarelo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 4:238-244.
- Oliveira RA, Daros E, Zambon JLC, Weber H, Ido OT, Zuffellato-Ribas KC, Koehler HS & Silva DKT (2005) Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná: taxas de crescimento. *Scientia Agrária*, 6:85-89.
- Santos MA, Lyra GB, Lyra GB, Sedyama GC & Souza JL (2009) Coeficiente da cultura no estágio inicial de desenvolvimento para cana-de-açúcar em diferentes datas de plantio na região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas. *STAB*, 27:30-33.
- Tei F, Aikman DP & Scaife A (1996) Growth of Lettuce, Onion and Red Beet. 2. Growth Modelling. *Annals of Botany*, 78:645-652.
- Thorntwaite CW & Mather JR (1955) The water balance. Centerton, Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. 104p.
- Villa Nova NA, Pedro Júnior MJ, Pereira AR & Ometto JC (1972) Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base em função das temperaturas máxima e mínima. São Paulo, USP. 8p.(Caderno de Ciências da Terra, 30).
- Willmott CJ (1981) On the validation of models. *Physical Geography*, 2:184-194.