

Modelos de regressão não linear como ferramenta para descrever o crescimento vegetativo do morangueiro

Josiele Garcia Dutra^{1†}, Pollyane Vieira da Silva², Roberta Marins Nogueira Peil¹

¹ Universidade Federal de Pelotas; Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel; Departamento de Fitotecnia; Pelotas - Rio Grande do Sul, Brasil.

² Universidade Federal de Pelotas; Instituto de Física e Matemática; Departamento de Matemática e Estatística; Pelotas – Rio Grande do Sul, Brasil.

Resumo: O morangueiro é uma espécie cujos frutos são mundialmente apreciados, e a maneira como estas plantas crescem e desenvolvem-se tem impacto em sua produtividade e qualidade. O conhecimento sobre o crescimento da planta possibilita que técnicos, pesquisadores, e em especial produtores dominem o manejo da cultura ao longo do tempo, por isso, necessita-se que essa dinâmica de crescimento seja elucidada em estudos científicos. Os modelos de regressão não linear destacam-se como escolhas mais apropriadas para representar o crescimento de plantas. O objetivo deste trabalho foi estudar o incremento da massa seca de folhas de duas cultivares de morangueiro durante um ciclo de cultivo, utilizando, para isso, os modelos clássicos logístico e Gompertz, e o modelo Chanter. O experimento foi realizado em casa de vegetação, empregando as cultivares Albion e San Andreas, cultivadas em calhas com substrato e recirculação da solução nutritiva drenada. Sete coletas foram realizadas no período de março de 2022 a março de 2023, respectivamente, aos 30, 60, 120, 180, 240, 300 e 360 dias após o plantio. Foram obtidas estimativas dos parâmetros dos modelos, sendo duas delas com as seguintes interpretações práticas: 1 – momento de estabilização do crescimento; 2 - momento de desaceleração do crescimento. Foram utilizadas três medidas estatísticas para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos: critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação de Bayes (BIC) e desvio padrão residual (DPR). Conclui-se que, para a cultivar Albion, o modelo Chanter apresentou valores inferiores para os três avaliadores, porém, para a cultivar San Andreas, os avaliadores AIC e BIC indicaram o modelo logístico com o melhor ajuste, e o DPR indicou o modelo Chanter.

Palavras-chave: *Fragaria x ananassa* Duch.; Modelos de crescimento; Albion; San Andreas.

Nonlinear regression models as a tool to describe strawberry vegetative growth

Abstract: The strawberry plant is a species whose fruits are appreciated worldwide, and the way in which these plants grow and develop has an impact on their productivity and quality. Knowledge about the growth of the plant allows technicians, researchers, and especially producers to master the management of the crop over time, so it is necessary that these growth dynamics be elucidated in scientific studies. The objective of this work was to study the increment of leaf dry mass of two strawberry cultivars during a cultivation cycle, using the classic logistic and Gompertz models, and the Chanter model. The experiment was carried out in a greenhouse, using the Albion and San Andreas cultivars, grown in gutters with substrate, and recirculation of the drained nutrient solution. Seven collections were carried out from March 2022 to March 2023, respectively at 30, 60, 120, 180, 240, 300 and 360 days after planting. Estimates of the model parameters were obtained, two of which had the following practical interpretations: 1 – moment of growth stabilization; 2 - moment of slowdown in growth. Three statistical measures were used to evaluate the goodness of fit of the models: Akaike information criterion (AIC), Bayes information criterion (BIC), and residual standard deviation (SRD). It is concluded that, for the Albion cultivar, the Chanter model presented lower values for the three evaluators, however, for the San Andreas cultivar, the AIC and BIC evaluators indicated the logistic model with the best adjustment, and the DPR indicated the Chanter model.

Keywords: *Fragaria x ananassa* Duch.; Growth models; Albion; San Andreas.

†Autor correspondente: josiele.dutra@ufpel.edu.br

Manuscrito recebido em: 06/06/2024

Manuscrito revisado em: 30/09/2024

Manuscrito aceito em: 30/09/2024

Introdução

O morangueiro é uma planta cujos frutos são apreciados no mundo todo, seja pelo seu sabor, aroma, formato, coloração e versatilidade comercial, prestando-se a diversas finalidades industriais. Ademais, nos últimos anos, a produção mundial cresceu proporcionalmente mais do que a área produzida (ANTUNES *et al.*, 2021), o que indica incremento de produtividade, em parte associado aos avanços tecnológicos empregados na atividade, advindos de pesquisas aplicadas.

Muitos são os fatores que interferem na atividade de produzir morangos e, conseqüentemente, na sua rentabilidade técnica e financeira, destacando-se o conhecimento sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Por ser uma cultura de ciclo longo e de múltiplas colheitas e limpezas, a dinâmica de crescimento da planta é ainda pouco abordada em estudos científicos.

A escolha de uma cultivar deve ser baseada na produtividade, na qualidade do fruto e na distribuição da produção durante o ciclo de cultivo (DIEL *et al.*, 2018). As cultivares de dias neutros, que têm sua resposta reprodutiva influenciada, predominantemente, pela temperatura e não pelo fotoperíodo, podem estender a produção quase que continuamente (ANTUNES *et al.*, 2014), tornando-se opção interessante a quem deseja alcançar melhores preços de venda na entressafra.

Como o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo de cultivares de dias neutros se dá de forma concomitante e contínua, estudos que expliquem como ocorre o crescimento vegetativo dessas plantas também podem contribuir para que técnicos, pesquisadores, e em especial produtores, possam orientar e otimizar o manejo e identificar fatores influenciadores no crescimento ao longo do tempo. É possível também observar variações de crescimento entre diferentes cultivares, ainda que pertençam ao mesmo grupo de resposta fotoperiódica. Strassburger *et al.* (2010), ao estudarem as cultivares Diamante e Aromas, encontraram valores de acúmulo de massa seca de folhas de 47,85 e 48,53 g/planta ao fim de um ciclo de 186 dias após plantio, respectivamente. Já, Webler (2019) estudando a cultivar Albion, obteve dados de acúmulo de massa seca de folhas de 19,2 g/planta, aos 196 dias após plantio. Além disso, as plantas podem crescer distintamente, respondendo a uma série de estímulos ambientais diferentes. O crescimento das folhas, sendo este o principal órgão da estrutura vegetativa das plantas, constitui-se um bom indicador desse crescimento.

Os modelos de regressão não linear podem ser utilizados, dentre outras aplicações, para ilustrar como se comportam diversas variáveis de crescimento ao longo do tempo, como germinação (AZARIAS *et al.*, 2023), diâmetro de copa (WYZYKOWSKI *et al.*, 2015), peso de frutos (LUCIO *et al.*, 2021), dentre muitos outros aspectos, a depender da espécie e da fase de desenvolvimento de interesse. Estes modelos são os que mais aproximam-se ao comportamento sigmoidal de ganho de massa, padrão reconhecido para a maioria das plantas. Segundo Lima *et al.* (2019), seus parâmetros tem interpretação biológica e permitem aplicações práticas de suas características, além de resumirem, em poucos parâmetros, várias informações. Vários autores têm utilizado os modelos não lineares na descrição de curvas de crescimento vegetativo e reprodutivo de espécies vegetais, como abobrinha e pimentão (LUCIO *et al.*, 2015), morangueiro (DIEL *et al.*, 2018, 2024), pêssego (SILVA *et al.*, 2019), pimenta (DIEL *et al.*, 2020), dentre vários outros.

Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo estudar o crescimento vegetativo, neste caso, representado pela massa seca de folhas de duas cultivares de morangueiro de dias neutros, durante um ciclo de cultivo, utilizando, para isso, os modelos clássicos Logístico e Gompertz, como também, o modelo Chanter, que se constitui em um híbrido entre os supracitados, cujos parâmetros podem ser interpretados similarmente (FRANCE; THORNLEY, 1984).

Material e Métodos

O trabalho foi realizado no Campo Didático-Experimental do Departamento de Fitotecnia, na Universidade Federal de Pelotas, Campus Capão do Leão, RS (31°52' S, 52°21' O, e 13m de altitude), em casa de vegetação com cobertura plástica de polietileno. As cultivares escolhidas para a condução do experimento foram Albion e San Andreas, ambas de dias neutros, cujas mudas foram importadas de viveiro localizado na Província de Segóvia, na Espanha. O experimento foi conduzido em um delineamento casualizado em blocos, com quatro blocos de cada cultivar, contendo as parcelas correspondentes a cada coleta.

O cultivo se deu em espaçamento de 0,15m entre plantas, em calhas de madeira com as dimensões (7,5m x 0,20m x 0,10m), impermeabilizadas internamente com plástico, preenchidas com substrato de casca de arroz carbonizada e dispostas sobre bancadas com declividade de 4%. Um sistema de bombas foi acoplado aos reservatórios, de modo a impulsionar a solução nutritiva à extremidade de cota mais alta dos canais. A partir deste ponto, a solução era fornecida às plantas através de fita de gotejamento. A solução drenada na extremidade inferior das calhas era coletada e retornava ao reservatório correspondente, configurando-se em um sistema recirculante. A solução nutritiva de Sonneveld & Straver (1994) foi ajustada conforme o crescimento e o desenvolvimento da cultura e as condições climáticas predominantes, e sua frequência foi regulada por temporizadores. Os dados de temperatura máxima e mínima foram coletados diariamente através de um termohigrômetro digital localizado dentro da casa de vegetação. O pH e a condutividade elétrica foram monitorados diariamente e corrigidos conforme a necessidade.

Os dados foram coletados no período de 28 de março de 2022 a 23 de março de 2023. A massa seca de folhas, em g/planta, foi avaliada em um ciclo de aproximadamente um ano, em que foram realizadas sete coletas, respectivamente aos 30, 60, 120, 180, 240, 300 e 360 dias após o plantio. A cada coleta, foram retiradas quatro parcelas (uma de cada bloco), constituídas por 2 plantas cada, por cultivar.

A massa seca de folhas provenientes de limpezas realizadas nas plantas, no intervalo entre uma coleta e outra, foi somada à massa seca de folhas do dia da coleta subsequente. A esses dados, foram ajustados os modelos não lineares logístico, Gompertz e Chanter, descritos a seguir.

$$\text{Modelo logístico: } y_i(x) = \frac{\beta_1}{1+e^{-\beta_2-\beta_3x_i}} + \epsilon_i$$

$$\text{Modelo Gompertz: } y_i(x) = \beta_1 e^{\{-e^{[-\beta_2(x_i-\beta_3)]}\}} + \epsilon_i$$

$$\text{Modelo Chanter: } y_i(x) = \frac{\beta_1\beta_2}{\beta_1+(\beta_2-\beta_1)e^{\left[\frac{-\beta_3}{\beta_4}(1-e^{-\beta_4x_i})\right]}} + \epsilon_i$$

em que $i = 1, 2 \dots n$, β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são parâmetros distintos em cada modelo.

Nos modelos logístico e Gompertz, o parâmetro β_1 representa a capacidade de sustentação do meio, é uma assíntota horizontal superior à direita, ou seja, quando o crescimento de folhas tende a estabilizar-se. O ponto de transição do crescimento das plantas, que passa de uma velocidade

crescente para uma velocidade decrescente, ocorre no ponto $(-\frac{\beta_2}{\beta_3}, \frac{\beta_1}{2})$ para o modelo logístico, e no ponto $(\beta_3, \frac{\beta_1}{e})$ para o modelo Gompertz (MISCHAN; PINHO, 2014).

O modelo Chanter foi proposto por Dennis Osborne Chanter em 1976 e possui 4 parâmetros, diferentemente dos modelos citados acima, que possuem 3 parâmetros. Seus parâmetros possuem a seguinte condição: $\beta_2 > \beta_1$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ positivos e β_4 pode assumir tanto valores positivos quanto valores negativos. É possível verificar que são assíntotas horizontais, as retas $y = \frac{\beta_1\beta_2}{\beta_1 + (\beta_2 - \beta_1)e^{-\frac{\beta_3}{\beta_4}}}$ e $y = 0$ para $\beta_4 > 0$ e $y = \beta_2$ e $y = \frac{\beta_1\beta_2}{\beta_1 + (\beta_2 - \beta_1)e^{-\frac{\beta_3}{\beta_4}}}$ para $\beta_4 < 0$ e que o parâmetro β_1 é o intercepto.

Para o modelo Chanter, ainda não foi encontrada a expressão matemática que represente o ponto de inflexão da curva (SILVA; SAVIAN, 2019).

As estimativas dos parâmetros foram obtidas por meio do método dos mínimos quadrados. O algoritmo de estimativa dos parâmetros em regressão não linear mais comum, e que foi utilizado neste trabalho, é o método de Gauss-Newton.

Para comparar esses modelos, foram utilizadas três medidas estatísticas para qualidade do ajuste: o critério de informação de Akaike (AIC), o critério de informação de Bayes (BIC) e o desvio padrão residual (DPR). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o *software* R (R CORE TEAM, 2024).

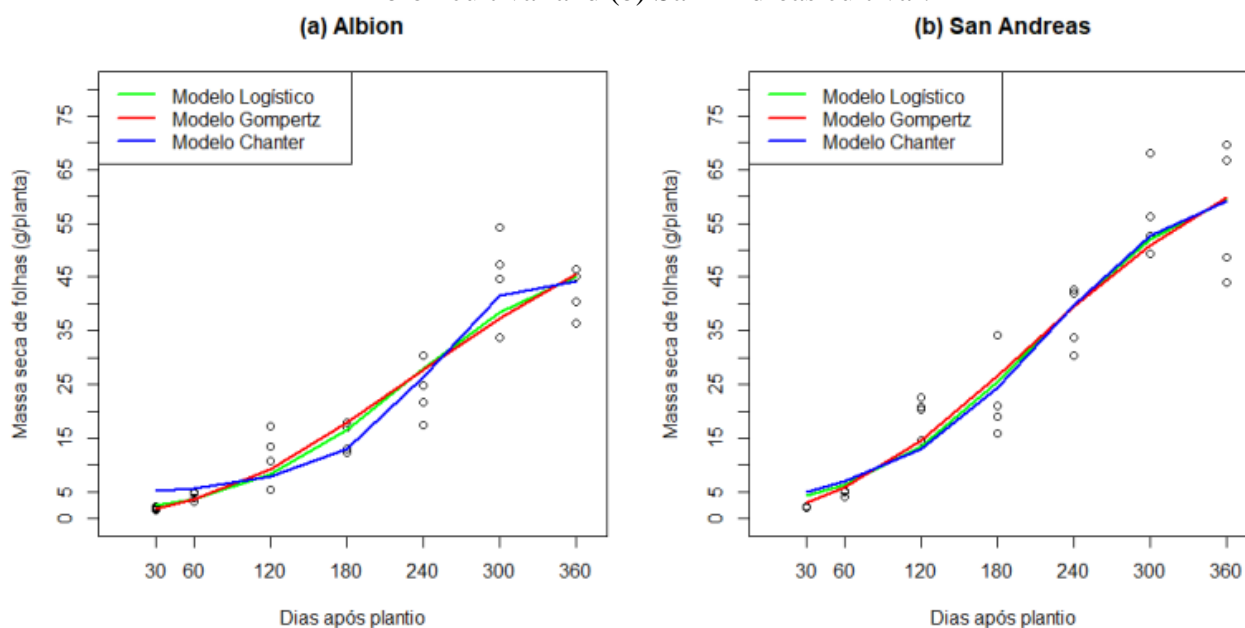
Resultados e discussão

Foram ajustados os modelos não lineares Logístico, Gompertz e Chanter aos dados de massa seca de folhas das cultivares Albion e San Andreas, conforme Figura 1, e as estimativas dos parâmetros (erros-padrão) apresentadas na Tabela 1.

Pode-se observar na Figura 1, que os modelos se ajustam bem aos pontos de dispersão da curva para ambas as cultivares, ainda que o modelo Chanter se mostre mais flexível ao comportamento dos dados, em especial para a cultivar Albion.

As estimativas dos parâmetros dos três modelos, que representam a assíntota horizontal superior à direita (Tabela 1), isto é, os valores máximos alcançados pelas folhas no período estudado foram, para a cultivar Albion, segundo o modelo Chanter, de 44,3 g/planta (β_2), seguido do modelo logístico, com 51,31 g/planta (β_1), e do modelo Gompertz, com 69,1 g/planta (β_1), observados no intervalo entre 300 e 360 dias após plantio. Para a cultivar San Andreas, segundo o modelo Chanter, o valor máximo de crescimento de folhas alcançado pelas plantas foi de 61,52 g/planta (β_2), seguido pelo modelo logístico, com 66,21 g/planta (β_1), e do modelo Gompertz, com 81,06 g/planta (β_1), o que coincidiu, também, com o intervalo de 300 a 360 dias após plantio.

Figure 1: Scatter plots of the dry leaf mass data of strawberry plants over a 360-day cycle: (a) Albion cultivar and (b) San Andreas cultivar.



Source: from the authors (2024).

Table 1: Estimates (standard error) of the parameters of the Chanter, logistic, and Gompertz models for the dry leaf mass data of the Albion and San Andreas strawberry cultivars.

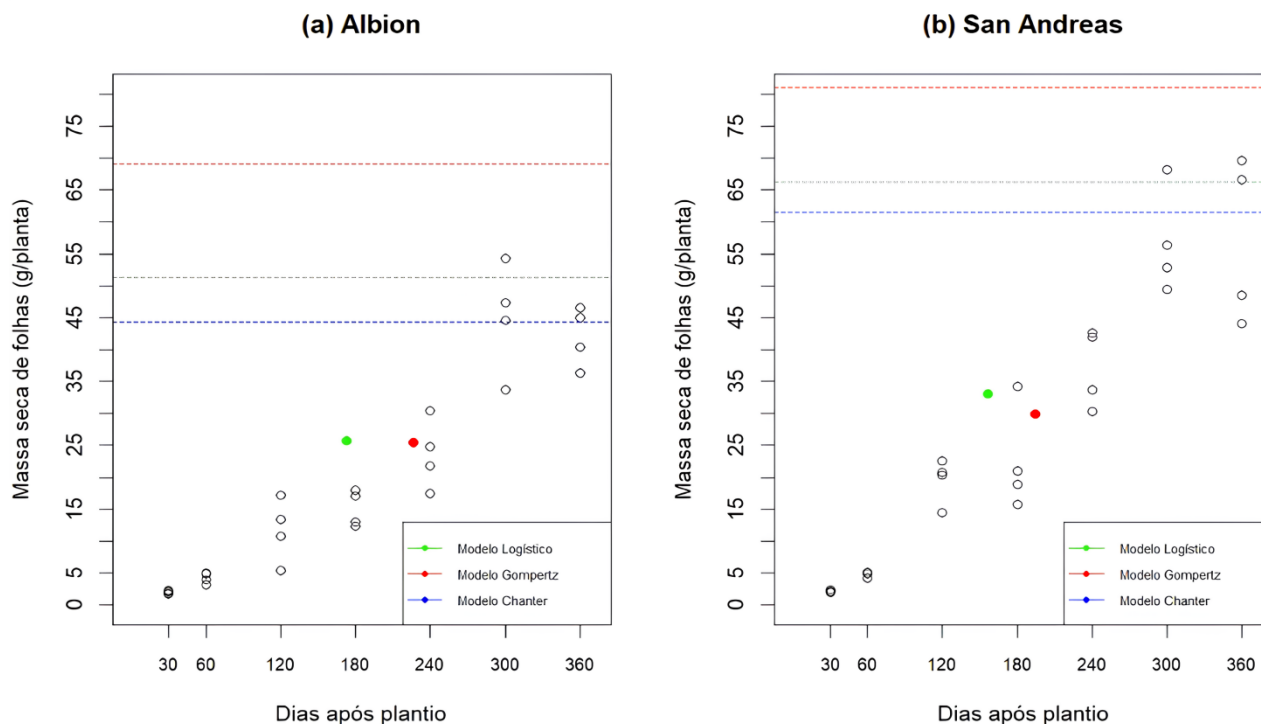
| | Albion | | | San Andreas | | |
|-----------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| | Chanter | logístico | Gompertz | Chanter | logístico | Gompertz |
| β_1 | 4,85 (1,91) | 51,31 (6,95) | 69,09 (22,61) | 3,75 (2,72) | 66,21 (7,90) | 81,06 (18,86) |
| β_2 | 44,3 (2,65) | -3,46 (0,51) | 0,07 (0,00) | 61,52 (8,55) | -3,13 (0,44) | 0,07 (0,00) |
| β_3 | 0,002 (0,00) | 0,02 (0,00) | 226,7 (58,88) | 0,01 (0,01) | 0,02 (0,00) | 194,6 (40,10) |
| β_4 | -0,01 (0,01) | | | -0,002 (0,01) | | |

Source: from the authors (2024).

O modelo logístico apresentou valor de β_1 menor do que o valor do modelo Gompertz observado na Tabela 1, para ambas as cultivares, assemelhando-se mais aos dados reais representados pelos pontos do diagrama de dispersão (Figura 1), o que corrobora com seus valores de erro-padrão inferiores (Tabela 1). O modelo Chanter apresenta, para Albion, β_2 mais próximo aos dados, com erro-padrão inferior aos demais, mas para San Andreas, apresenta erro-padrão ligeiramente superior ao modelo Logístico.

Observa-se na Figura 2 que, para ambas as cultivares, as assíntotas dos modelos logístico e Chanter ficaram mais próximas do que a assíntota do modelo Gompertz. Pode-se notar também que o ponto de inflexão do modelo logístico ocorre antes do que o ponto de inflexão do modelo Gompertz para ambas as cultivares.

Figure 2: Representation of the right horizontal asymptotes (dashed lines) of the logistic, Gompertz, and Chanter models, and inflection points of the logistic and Gompertz models (filled points) over a 360-day cycle of the strawberry plant: (a) Albion cultivar and (b) San Andreas cultivar.



Source: from the authors (2024).

O ponto de inflexão da curva representa o momento em que houve uma desaceleração do crescimento de folhas. Para a cultivar Albion, segundo o modelo logístico, este momento ocorreu aos 173 dias, o que corresponde ao dia 17/09/2022, com massa seca de folhas de 25,66 g/planta (Figura 2). Essa data coincide com o período de maturação de um grande volume de frutos (Figura 3A), o que indica uma redução significativa da relação fonte dreno, em função da alta demanda de drenos da planta. Segundo Taiz *et al.* (2017), as fontes, geralmente folhas maduras, são os órgãos exportadores, capazes de produzir fotoassimilados (produtos da fotossíntese) além de suas necessidades e direcionar aos drenos, que não os produzem em quantidade suficiente para suas próprias necessidades de crescimento ou reserva, como por exemplo, os frutos em desenvolvimento, as raízes e as folhas imaturas. Quando a planta está com uma carga elevada de frutos, se estabelece uma forte competição pelos assimilados entre estes e os órgãos vegetativos, o que determina uma menor alocação nas folhas e, conseqüentemente, um menor ganho de massa seca destes órgãos.

O modelo Gompertz, ainda para a cultivar Albion, indicou que essa desaceleração do crescimento das folhas foi quando a massa seca era de 25,49 g/planta, semelhante ao modelo anterior, porém, indicando a sua ocorrência aos 227 dias, correspondentes ao dia 10/11/2022, 54 dias mais tarde em relação ao modelo logístico, após decorridas várias colheitas, o que possivelmente esteja em desacordo com a resposta fisiológica real. Diel *et al.* (2021), aplicando o modelo logístico a dados de múltiplas colheitas de morango em período de ciclo longo, observou bom ajuste a todos os tratamentos, com R^2 acima de 0,97.

Para a cultivar San Andreas, o modelo logístico indicou que o momento de desaceleração do crescimento das folhas foi aos 157 dias, no dia 01/09/2022, com 33,11 g/planta. A diferenciação floral, segundo Neri *et al.* (2010), constitui-se em alterações morfológicas do meristema apical, em que ocorre uma diferenciação de estruturas vegetativas para reprodutivas. A faixa ótima de temperatura para que ocorra é entre 14 °C e 18 °C (DURNER *et al.*, 1984), o que corrobora com as médias de temperatura observadas no período de julho a setembro (Tabela 2), e torna possível que a desaceleração do crescimento de folhas tenha ocorrido conforme aponta o modelo. O modelo Gompertz indicou desaceleração do crescimento das folhas aos 195 dias após plantio, com 29,91 g/planta, em 09/10/2022. O amadurecimento dos frutos de ‘San Andreas’ iniciou efetivamente após o amadurecimento dos frutos da cultivar Albion, portanto, pode ser coerente que o ponto de desaceleração do crescimento das folhas seja posterior aos 173 dias indicados para a mesma.

A tabela 2 apresenta os valores de temperatura do período do experimento, coletados na casa de vegetação, e ajustados em médias mensais de temperatura máxima, mínima e média.

Observa-se que o comportamento crescente do ganho de massa seca de folhas (Figura 1) acompanha a evolução da temperatura média dos meses correspondentes à realização do experimento (Tabela 2), demonstrando uma relação clara entre o crescimento de folhas e o aumento da temperatura, que associada à radiação solar, impulsionam o metabolismo vegetal e os processos fotossintéticos.

Segundo Galletta Bringham (1990), o crescimento das folhas do morangueiro ocorre numa faixa ampla de temperatura, desde próximo do ponto de congelamento, embora mais lento, até 35 °C. Dado este amplo espectro, cujas médias mensais estão compreendidas em todo o período de experimento (Tabela 2), este estímulo ambiental progressivo pode incorrer em importantes alterações no metabolismo vegetal. Com isso, as plantas podem passar, segundo os resultados obtidos para ambas as cultivares, de uma massa seca de folhas de entre 25,49 e 33,1 g/planta, no período entre 157 e 227 dias após plantio (Figura 2), apresentando, neste momento, estrutura mais uniforme e compacta (Figura 3A), para uma massa seca de folhas de 44,3 a 81,06 g/planta, no período entre 300 e 360 dias após plantio (Figura 1), correspondendo a uma estrutura expandida, com grande volume foliar (Figura 3B).

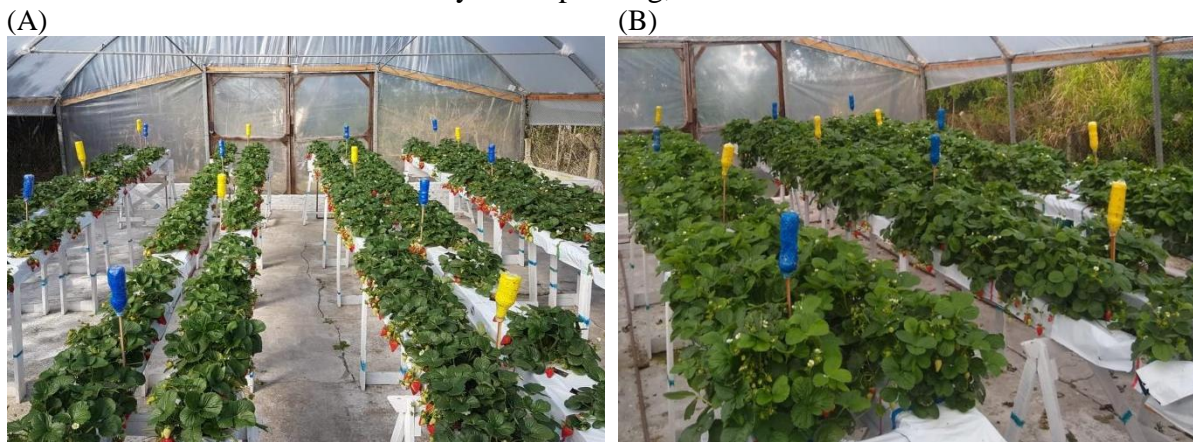
Porém, segundo Gonçalves *et al.* (2016), a faixa ideal para o crescimento vegetativo do morangueiro é entre 20°C e 32°C. As temperaturas máximas mensais observadas no período entre novembro e março ultrapassaram o limite superior (Tabela 2), podendo serem causadoras de alguns distúrbios, como o aumento da respiração, do gasto de energia e da transpiração, com a diminuição da fotossíntese líquida (TAIZ *et al.*, 2017).

Realizou-se análise dos resíduos dos modelos em estudo utilizando o teste de Shapiro-Wilk, conforme Tabela 3.

Todos os p-valores foram maiores que 0,05, indicando assim que os erros possuem distribuição normal. Os modelos em estudo foram submetidos a três avaliadores de qualidade do ajuste: AIC, BIC e DPR, e estão apresentados na Tabela 4.

Pode-se detectar que, para a cultivar Albion, o modelo Chanter apresentou valores inferiores para os três avaliadores (Tabela 4).

Figure 3: Images of the experiment (A) at 180 days after planting, on 09/24/2022, and (B) at 300 days after planting, on 01/21/2023.



Source: from the authors (2024).

Table 2: Maximum, minimum, and average temperatures, in °C, for the months corresponding to the experiment period.

| Ano | Mês | Máxima | Mínima | Média |
|------|-----|--------|--------|-------|
| 2022 | Abr | 30,2 | 14,0 | 22,1 |
| | Mai | 23,5 | 9,8 | 16,6 |
| | Jun | 19,1 | 7,7 | 13,4 |
| | Jul | 20,4 | 9,4 | 14,9 |
| | Ago | 23,3 | 9,4 | 16,4 |
| | Set | 25,4 | 10,8 | 18,1 |
| | Out | 29,1 | 13,8 | 21,5 |
| | Nov | 33,6 | 16,8 | 25,2 |
| | Dez | 36,8 | 18,9 | 27,9 |
| 2023 | Jan | 36,3 | 20,8 | 28,5 |
| | Fev | 33,6 | 20,6 | 27,1 |
| | Mar | 33,5 | 21,0 | 27,2 |

Source: from the authors (2024).

Table 3: P-values of the Shapiro-Wilk test for the dry leaf mass data of the strawberry plants.

| | Valor-p | |
|-----------|---------|-------------|
| | Albion | San Andreas |
| Chanter | 0,1908 | 0,8257 |
| logístico | 0,0725 | 0,6472 |
| Gompertz | 0,5175 | 0,5685 |

Source: from the authors (2024).

Table 4: Fit quality evaluators of the Chanter, logistic, and Gompertz models for the dry leaf mass data of the Albion and San Andreas strawberry cultivars.

| | Albion | | | San Andreas | | |
|-----------|----------|----------|--------|-------------|----------|--------|
| | AIC | BIC | DPR | AIC | BIC | DPR |
| Chanter | 179,6169 | 186,2780 | 5,0939 | 198,4177 | 205,0787 | 7,1250 |
| logístico | 182,0652 | 187,3940 | 5,5128 | 196,5768 | 201,9056 | 7,1462 |
| Gompertz | 184,1161 | 189,4449 | 5,7198 | 196,9681 | 202,2969 | 7,1970 |

Source: from the authors (2024).

Com base nos avaliadores de qualidade de ajuste apresentados na tabela 4, há indícios de que o modelo Chanter é o melhor para o ajuste dos dados da cultivar Albion, sendo assim, a equação de predição do modelo Chanter para a massa seca de folhas do morangueiro fica:

$$y^{\wedge} = \frac{4,85.44,3}{4,85 + (44,3 - 4,85)e^{\left[\frac{0,002}{0,01}(1-e^{0,01x})\right]}}$$

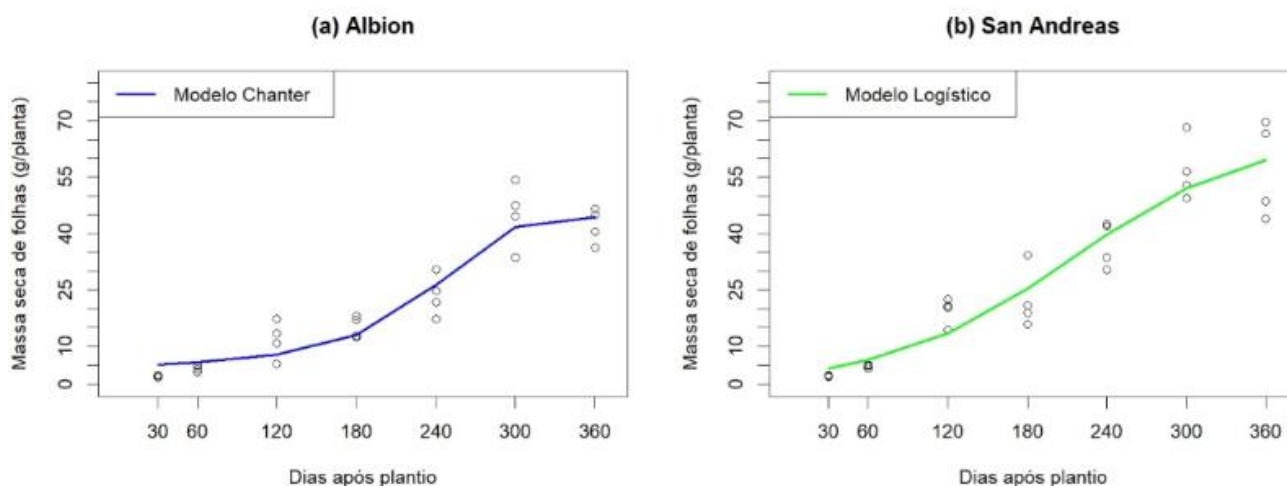
Para a cultivar San Andreas, os avaliadores AIC e BIC indicaram o modelo logístico com o melhor ajuste, e o DPR indicou o modelo Chanter. Sendo assim, a equação de predição do modelo logístico fica:

$$y^{\wedge} = \frac{66,21}{1 + e^{(3,13-0,02x)}}$$

A partir das equações ajustadas pelos modelos que apresentaram os melhores ajustes segundo os avaliadores, é possível substituir o valor de x pelo número inteiro correspondente a qualquer dia do intervalo entre 0 e 360 dias após o plantio. Isso permite a predição da massa seca de folhas que as plantas apresentarão em um momento específico do ciclo. Adicionando à Figura 4, este dia específico ao eixo x , e o resultado da equação ao eixo y do diagrama de dispersão correspondente, é possível visualizar o comportamento da curva com uma maior precisão. Essa predição, como uma representação significativa do crescimento vegetativo, possibilita aos profissionais da área, especialmente aos produtores, um melhor planejamento em relação à demanda de mão-de-obra para os tratos culturais, à aquisição dos insumos necessários e à programação da fertirrigação.

O crescimento das plantas influencia diretamente o manejo da composição da solução nutritiva a ser disponibilizada no período. Durante os períodos de maior crescimento vegetativo, é fundamental ajustar os teores de nitrogênio (N) e potássio (K), reduzindo a relação K/N da solução nutritiva. Para a manutenção dos inúmeros processos fisiológicos e bioquímicos envolvidos no crescimento, ocorre uma alta absorção de N, que pode resultar em um crescimento vegetativo descontrolado, em detrimento do reprodutivo (TAIZ *et al.*, 2017). Dessa forma, o ajuste dos teores de N e K contribui para o equilíbrio entre o crescimento vegetativo e a manutenção da floração e frutificação. É importante destacar que outros manejos nutricionais podem ser necessários conforme o crescimento da cultura.

Figure 4: Scatter plots of the dry leaf mass data of strawberry plants according to the models that showed the best fit for the Albion (Chanter) and San Andreas (logistic) cultivars over a 360-day cycle.



Source: from the authors (2024).

Conclusões

Conclui-se que a cultivar Albion estabiliza seu crescimento de massa seca de folhas em 44,3 g/planta, e a cultivar San Andreas, em 66,21 g/planta, ambas entre 300 e 360 dias após plantio. O momento em que a curva passa de um crescimento acelerado para um crescimento desacelerado, na cultivar Albion é aos 173 dias após o plantio, quando a massa seca de folhas era de 25,66 g/planta. Na cultivar San Andreas este momento ocorre aos 157 dias, com 33,11 g/planta.

Com base nos avaliadores de qualidade de ajuste dos modelos estudados, para a cultivar Albion o modelo Chanter é o que melhor descreve os dados de massa seca de folhas. Para a cultivar San Andreas, o modelo logístico apresenta melhor ajuste segundo dois dos três avaliadores.

Referências

ANTUNES, M. C. et al. Postharvest quality of strawberry produced during two consecutive seasons. **Horticultura Brasileira**, v. 32, p.168-173, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000200008>> Acesso em 23 mai. 2024.

ANTUNES, L.E.C.; REISSER JUNIOR, C.; BONOW, S. Morango: produção aumenta ano a ano. **Campo & Negócios**, v. 1, p. 87-90, 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222342/1/Antunes-Anuario-HF-2021-pag-87.pdf> Acesso em 24 mai. 2024.

DE LIMA, K. P. et al. Modelagem não linear da biomassa seca do feijoeiro cv. Jalo. **Sigmae**, v. 8, n. 2, p.359-369, 2019. Disponível em <<https://publicacoes.unifal-mg.edu.br/revistas/index.php/sigmae/article/view/974>> Acesso em 25 mai. 2024.

DIEL, M. I. et al. Nonlinear regression for description of strawberry (*Fragaria x ananassa*) production. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, p. 1–15, 2018. Disponível em: <<https://doi:10.1080/14620316.2018.1472045>> Acesso em 24 mai. 2024.

DIEL, M. I., et al. Behavior of strawberry production with growth models: a multivariate approach. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 43, p. e47812, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.47812>>. Acesso em 28 set. 2024.

DIEL, M. I., et al. Production of biquinho pepper in different growing seasons characterized by the logistic model and its critical points. **Ciência Rural**, v. 50, p. e20190477, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190477>> Acesso em 28 set. 2024.

DIEL, M. I. et al. Nonlinear Logistic Model for Describing Strawberry Fruit Production. **Agronomy**, v. 14, n. 9, p. 1884, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy14091884>> Acesso em 29 set. 2024.

DURNER, E. F. et al. Photoperiod and temperature effects on flower and runner development in day-neutral, June-bearing and everbearing strawberries. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 109, p. 396-400, 1984. Disponível em: <<https://doi.org/10.21273/JASHS.109.3.396>>Acesso em 25 mai. 2024.

FRANCE, J.; THORNLEY, J. H. M. **Mathematical models in agriculture**. London: Butterworks, p.335. 1984.

- GALLETA, G. J.; BRINGHURST, R. S. Strawberry management. In: GALLETA, G. J.; HIMELRICK, D. G. (Ed.). **Small fruit crop management**. New Jersey: Prentice-Hall, p. 83-93, 1990.
- GONÇALVES, M. A. et al. Crescimento e Desenvolvimento. In: ANTUNES, L. E. C.; JÚNIOR, C. R. et al (Ed). **Morangueiro**. Brasília, DF: Embrapa Clima Temperado, v. 1, cap.3, p.47-66, 2016. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/179724/1/Luis-Eduardo-MORANGUEIRO-miolo.pdf>> Acesso em 26 mai.2024.
- LÚCIO, A. D.; NUNES, L. F.; REGO, F. Nonlinear models to describe production of fruit in Cucurbita pepo and Capsicum annum. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 193, n. 13, p. 286-293, 2015. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.021>> Acesso em 24 mai. 2024.
- LÚCIO, A. D. C., DIEL, M. I., SARI, B. G. An approach for experiment evaluations for multiple harvests crops based on non-linear regression. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 250-257, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0102-0536-20210302>> Acesso em 28 set. 2024.
- MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. **Modelos não lineares**. 1. ed. - São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014.
- NERI, D.; SANVINI, G.; MASSETANI, F. Arquitetura della pianta. In: FAEDI, W.; ANGELINI, R. **La fragola**. Bologna: Bayer CropScience, p. 142-151, 2010.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, 2024. Disponível em <<http://www.R-project.org/>>
- SILVA, E. M. et al. O crescimento de frutos de pêssegos caracterizados por modelos de regressão não lineares. **Sigmae**, Alfenas, v.8, n.2, p. 290-294, 2019. Disponível em: <<https://publicacoes.unifal-mg.edu.br/revistas/index.php/sigmae/article/view/958>> Acesso em 29 set. 2024.
- SILVA, P. V.; SAVIAN, T. V. Chanter model: nonlinear modeling of the fruit growth of cocoa. **Revista Ciência Rural**, v.49, n.11, p. e20190409, 2019. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190409>> Acesso em 25 mai. 2024.
- SONNEVELD C; STRAVER N. **Nutrient solution for vegetables and flowers grown in water or substrates**. 10th ed. The Netherlands: proefstation voor Tuinbouw onder Glas Te Naaldwijk. Series: Voedingsoplossingen Glastuinbouw, n. 8, 45p., 1994.
- STRASSBURGER, A. S. et al. Crescimento e produtividade de cultivares de morangueiro de "dia neutro" em diferentes densidades de plantio em sistema de cultivo orgânico. **Bragantia**, v.69, p.

623-630. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300014>> Acesso em: 23 mai. 2024.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 858 p. 2017.

WEBLER, A. R. **Partição de massa seca, produção e qualidade de morango em função do sistema de fertirrigação e da origem das mudas**. 65f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/18727/DIS_PPGAAA_2019_WEBLER_ANDERSON.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 26 mai. 2024.

WYZYKOWSKI, J. et al. Análise do diâmetro de copa do cafeeiro recepado utilizando um modelo não linear misto. **Revista Brasileira de Biometria**. São Paulo: v.33, n.3, p.243-256. 2015. Disponível em: <https://biometria.ufla.br/antigos/fasciculos/v33/v33_n3/A5_Jair_Anselmo.pdf> Acesso em 28 set. 2024.