

APLICAÇÃO DE UM MODELO ESTATÍSTICO NA PREVISÃO DO CRESCIMENTO DE CULTIVARES DE ALFACE

Victor Augusto Bertin Borges¹, Glauco Vieira Miranda², André Sandmann³, Jakeline da Silva Andrade⁴, Edenilson Tremea Furlan⁵, Claudio Leones Bazzi⁶.

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil
(victorborges@utfpr.edu.br)

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Brasil

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil

⁴ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil

⁵ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil

⁶ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Brasil

Resumo: Este trabalho analisou o crescimento de 34 cultivares de alface a partir de registros diários de altura em pixels durante dez dias. Para permitir comparações entre indivíduos, foi calculado o crescimento relativo percentual com base no dia zero. Os valores médios foram ajustados por regressão polinomial de segundo grau, com um R^2 de 0,99. O modelo demonstrou alta aderência e utilidade na previsão do crescimento vegetal via imagens digitais.

Palavras-chave: Crescimento vegetal; Cultivo de alface; Regressão polinomial; Análise de imagens; Modelagem estatística.

INTRODUÇÃO

O crescimento das plantas é um fenômeno complexo, resultante da interação dinâmica de processos fisiológicos, bioquímicos e metabólicos, os quais são modulados por diversas variáveis ambientais interconectadas no desenvolvimento vegetal (Wang et al., 2022). Segundo Alhnaity et al. (2019), essa forte dependência em relação às condições ambientais impõe consideráveis desafios à previsão desse processo, uma vez que seu desenvolvimento ocorre de maneira dinâmica e não linear.

Apesar dessas dificuldades, diversos autores, como Sakurai et al. (2019) e Yasrab et al. (2021), ressaltam a importância da previsão do crescimento vegetal. Segundo eles, a capacidade de antecipar o comportamento das plantas é essencial para acelerar experimentos de melhoramento genético ou agrônomico e para viabilizar diagnósticos precoces de anomalias no crescimento, contribuindo para a mitigação de perdas agrícolas.

Dentro desse contexto, a alface (*Lactuca sativa* L.) se destaca como um modelo relevante para estudos de previsão de crescimento, tanto pela sua importância econômica quanto pela sensibilidade às variações ambientais. Essa sensibilidade torna seu desenvolvimento altamente dependente de fatores externos, o que reforça a necessidade de métodos analíticos capazes de capturar essa complexidade.

Nesse sentido, a aplicação de modelos matemáticos de previsão surge como uma abordagem promissora para descrever quantitativamente o crescimento vegetal, permitindo identificar padrões nos dados experimentais e viabilizando análises comparativas entre cultivares e uma gestão mais eficiente dos recursos agrícolas.

Dentre as abordagens possíveis, os modelos de regressão polinomial se destacam por sua flexibilidade na representação de comportamentos não lineares. Enquanto a literatura frequentemente emprega modelos logísticos, sigmóides ou outros modelos não lineares para descrever o crescimento vegetal, a escolha da regressão polinomial neste estudo foi motivada pela sua capacidade de se ajustar a padrões de crescimento que podem não seguir uma curva sigmoide clássica. Tal decisão baseou-se em uma análise exploratória inicial dos dados, que indicou a não-presença de um comportamento sigmoide padrão, pela limitação da janela de observação. Ao ajustar equações polinomiais aos dados observados, é possível modelar o crescimento das plantas diretamente, aproximando-se da realidade experimental mesmo em cenários com alta variabilidade. Essa estratégia é especialmente útil quando os dados não seguem uma curva típica, mas apresentam tendências mais complexas, como frequentemente ocorre em experimentos sob condições ambientais variáveis. Nesse sentido,

modelos não-assintóticos como as equações polinomiais tornam-se particularmente úteis para representar o crescimento de plantas em experimentos de curta duração, onde a fase de estabilização não é capturada. Como apontado por Paine et al. (2011), a escolha entre modelos assintóticos e não-assintóticos depende do intervalo temporal considerado, sendo os últimos mais apropriados quando se observa apenas a fase inicial do desenvolvimento.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo realizar a previsão do crescimento de cultivares de alface por meio do modelo de regressão polinomial. Para isso, são utilizados dados da área ocupada pelas plantas, extraídos de imagens capturadas ao longo de um período de dez dias. Esses dados foram obtidos a partir de trabalho correlato dos autores, no qual a segmentação das plantas foi realizada de três modos: manual, utilizando técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) e métodos baseados em inteligência artificial. A análise baseada em imagens representa uma alternativa não destrutiva, reprodutível e compatível com sistemas automatizados de fenotipagem (Araus & Cairns, 2014).

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada neste estudo, que tem como foco a aplicação do modelo regressão polinomial na previsão do crescimento de cultivares de alface, foi dividida em quatro etapas principais. Essas etapas incluem desde a coleta dos dados até o ajuste e a avaliação do modelo matemático, conforme ilustrado na Figura 1.

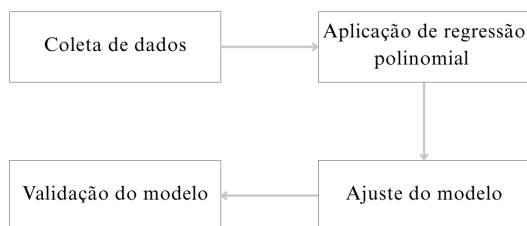


Figura 1. Fluxograma de atividades.

Na primeira etapa da metodologia, foram selecionados os dados provenientes do estudo conduzido por um dos autores, que investigou o crescimento de hortaliças cultivadas em ambiente controlado por meio de um sistema hidropônico. No experimento, trinta e cinco plantas foram dispostas sobre bancadas e monitoradas ao longo de dez dias consecutivos. Durante esse período, imagens diárias das plantas foram capturadas com o objetivo de estimar sua área foliar, utilizando diferentes abordagens de segmentação de imagem. A segunda etapa incluiu a organização e tratamento desses dados, de forma a dar sentido para o resultado da

regressão polinomial aplicada. A terceira etapa objetivou ajustar o modelo, gerando a equação que define o crescimento de cultivares de Lactuca sativa L. em dez dias após o replantio. Por último, a validação do modelo foi realizada por meio da análise de seu coeficiente de correlação.

Três métodos distintos foram aplicados na extração da área foliar: técnicas tradicionais de Processamento Digital de Imagens (PDI), o modelo de detecção e segmentação automática YOLO, e a segmentação manual. Esta última foi realizada pelos próprios autores do estudo, que utilizaram as mesmas imagens como base, porém realizando a separação visual das hortaliças de forma individualizada, sem auxílio de algoritmos automáticos. O procedimento manual teve como finalidade gerar uma referência mais próxima da área real ocupada pelas plantas nas imagens, servindo como padrão de comparação para validar os métodos automatizados.

Considerando a precisão dessa abordagem manual, este trabalho adota os dados por ela gerados como base para a modelagem do crescimento vegetal, por representarem com maior fidelidade a área foliar efetiva das hortaliças.

Como parte desse processo de tratamento dos dados, foi identificada uma planta com comportamento atípico de crescimento, apresentando valores sistematicamente inferiores aos demais indivíduos da amostra. Essa discrepância pode ser visualizada na Figura 2, na qual o dado correspondente está destacado em vermelho. Esta figura apresenta o dado bruto de tamanho final em pixels alcançado por cada uma das plantas no dia dez. É possível verificar que o outlier terminou o estudo com um tamanho muito próximo a zero, o que indica que esse indivíduo teve problemas de crescimento e os valores da sua altura não devem ser considerados para formação da equação que descreve o crescimento da população. Considerando-se sua condição de outlier, a planta foi excluída da base de dados utilizada para as análises subsequentes.

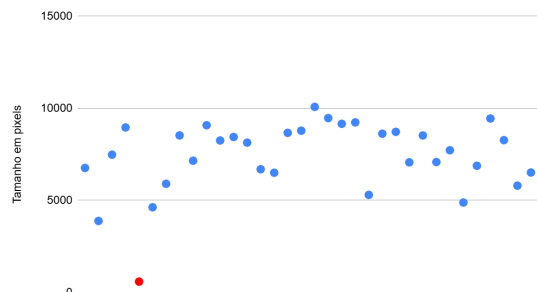


Figura 2. Gráfico de altura das plantas no último dia de coleta de dados.

O período de acompanhamento de dez dias foi suficiente para caracterizar a fase inicial de

crescimento, mas não permitiu observar tendências de estabilização ou saturação. Para modelos que visem descrever o ciclo completo da alface, seria necessário estender a coleta até que o crescimento desacelere ou se estabilize, o que permitiria testar diferentes funções matemáticas e comparar ajustes entre modelos.

Com o objetivo de viabilizar a comparação entre indivíduos com alturas iniciais distintas, foi calculado o crescimento relativo percentual diário de cada planta, tomando como referência sua altura no dia 0. O valor correspondente foi obtido por meio da razão entre a altura da planta em cada dia subsequente e sua altura no dia 0, subtraindo-se 1 da razão obtida, conforme expressa a equação 1, onde $CR(t)$ representa o Crescimento Relativo no tempo t , $P(t)$ representa a altura medida em pixels no tempo t , e $P(0)$ representa a altura medida no tempo 0.

$$CR(t) = \left(\frac{P(t)}{P(0)} \right) - 1 \quad (1)$$

Apesar de eficaz para eliminar o viés de tamanho inicial, o uso do crescimento relativo percentual pode amplificar pequenas variações nas plantas de menor porte, o que exige cuidado na interpretação dos resultados. Esse procedimento gerou uma matriz de crescimento relativo percentual, permitindo a comparação entre indivíduos de diferentes tamanhos iniciais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a exclusão do outlier e a transformação dos dados em valores de crescimento relativo percentual, foi calculada, para cada dia, a média do crescimento relativo entre todos os indivíduos remanescentes. Essa média tem como finalidade representar a tendência geral de crescimento da população ao longo do tempo. A curva resultante, construída a partir desses valores médios diários, está apresentada na Figura 3. O eixo vertical indica a média do crescimento relativo e o eixo horizontal indica o tempo decorrido desde o início do experimento. O uso da média suaviza flutuações individuais e é útil para identificar tendências globais no comportamento de crescimento.

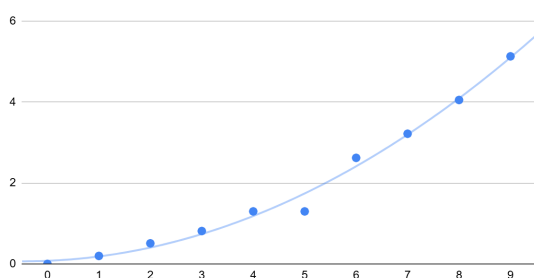


Figura 3. Gráfico de média do crescimento relativo ao dia 1.

A curva média de crescimento relativo foi ajustada por meio de uma equação polinomial de segundo grau, cujos coeficientes foram determinados utilizando recursos de regressão via software. A adoção de um modelo polinomial se justifica pela ausência de estabilização na curva média, característica esperada em modelos logísticos como o de Verhulst e pelo melhor ajuste deste aos dados, que não se mostraram passíveis de se adequar a outros modelos com comportamento sigmoidal. A equação obtida permite representar com maior precisão o padrão contínuo de crescimento observado nos dados. A equação do crescimento de uma hortaliça *Lactuca sativa* L. por dez dias após seu replantio pode ser descrito pela equação: A adoção de um modelo polinomial de segundo grau também atende ao princípio da parcimônia em modelagem estatística. Conforme discutido por Paine et al. (2011), conjuntos de dados reduzidos ou ruidosos favorecem o uso de modelos mais simples, evitando sobreajuste e instabilidade na estimação de parâmetros.

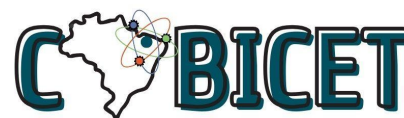
$$CR(t) = 0,077 + 0,0514t + 0,0563t^2 \quad (2)$$

A equação polinomial de segundo grau ajustada apresenta coeficientes positivos tanto no termo linear quanto no termo quadrático, o que indica uma tendência de aceleração no crescimento da alface ao longo do tempo observado. O pequeno valor da constante sugere que o modelo está fortemente ancorado nos efeitos temporais, reforçando a importância da duração do experimento para capturar esse padrão. A forma convexa da curva é compatível com fases iniciais de crescimento vegetal, nas quais ainda não há competição por recursos ou limitações fisiológicas acentuadas.

Ao longo dos 10 dias de observação, os valores médios de crescimento relativo apresentaram um comportamento monotônico crescente, sem indicativos de desaceleração ou aproximação a um limite superior. Diante disso, o uso de uma regressão polinomial permite capturar o comportamento empírico dos dados de forma mais aderente, sem impor uma estrutura teórica que não se verifica nas observações.

Embora muitos estudos em fisiologia vegetal empreguem modelos logísticos ou sigmoides para descrever o crescimento, trabalhos com experimentos de curta duração ou fases iniciais de desenvolvimento frequentemente recorrem a modelos polinomiais devido à sua flexibilidade e simplicidade (Paine et al., 2011). Assim, a opção pelo segundo grau se mostrou adequada para capturar o comportamento observado, sem exigir pressupostos de estabilização que não se verificam nas condições analisadas.

Para avaliar a qualidade do ajuste das curvas aos dados observados, foi realizado o cálculo do



coeficiente de determinação (R^2) para a média da população. O valor de R^2 foi extraído diretamente das ferramentas de ajuste do Sheets, refletindo o grau de aderência entre os valores observados e os estimados pela equação ajustada.

O ajuste polinomial de segundo grau realizado sobre os valores médios da população apresentou um coeficiente de determinação de 0,99, sugerindo que a curva média possui alta representatividade em relação ao comportamento coletivo.

Tabela 1. Valores em pixel de crescimento relativo ao dia 1 de quatro plantas.

	0	1	2	3
Dia 2	0,2966	0,4866	0,8573	0,0455
Dia 3	0,3496	3,0553	0,8805	-0,4973
Dia 4	0,9682	1,4866	1,6439	-0,1511
Dia 5	1,6165	1,7273	2,1160	0,6731
Dia 6	2,0307	2,1426	2,3933	0,0328
Dia 7	3,2098	3,2763	3,5986	1,9318
Dia 8	4,0900	3,8431	4,8562	2,7574
Dia 9	4,9820	4,8342	6,3794	3,8148
Dia 10	6,1674	5,9305	7,6856	4,9940

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a aplicação de métodos estatísticos, em especial a regressão polinomial de segundo grau, é eficaz para a caracterização do crescimento da alface no período estudado a partir de registros diários extraídos por imagem. A estratégia de conversão para crescimento relativo percentual com base no dia inicial permitiu a padronização dos dados e facilitou a análise populacional. A curva média de crescimento ajustada apresentou excelente desempenho, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99, evidenciando a aderência entre os dados experimentais e o modelo aplicado. A utilização de imagens como fonte primária de dados mostrou-se viável para fins de análise temporal do desenvolvimento vegetal. Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o período de observação e explorar métodos de aquisição automatizada, visando aumentar a precisão e a escalabilidade das análises. Recomenda-se, também, a análise aprofundada do crescimento relativo percentual com base no dia anterior para procura de padrões anômalos de crescimento que podem ter sido mitigados na análise baseada no dia inicial.

REFERÊNCIAS

- ALHNAITY, B.; PEARSON, S.; LEONTIDIS, G.; KOLLIAS, S. Using deep learning to predict plant growth and yield in greenhouse environments. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.00624>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- ARAUS, José Luis; CAIRNS, Jill E.. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. Trends In Plant Science, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 52-61, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- PAINE, C. E. Timothy et al. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. Methods In Ecology And Evolution, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 245-256, 29 set. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.2041-210x.2011.00155.x>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- SAKURAI, S.; UCHIYAMA, H.; SHIMADA, A.; TANIGUCHI, R. I. Plant growth prediction using convolutional LSTM. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION THEORY AND APPLICATIONS, 14., 2019, Prague. Anais [...]. Prague: SCITEPRESS, 2019. Acesso em: 28 abr. 2025.
- WANG, C.; PAN, W.; SONG, X.; YU, H.; ZHU, J.; LIU, P.; LI, X. Predicting plant growth and development using time-series images. Agronomy, v. 12, n. 9, p. 2213, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12092213>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- YASRAB, R.; ZHANG, J.; SMYTH, P.; POUND, M. P. Predicting plant growth from time-series data using deep learning. Remote Sensing, v. 13, p. 331, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13030331>. Acesso em: 28 abr. 2025.