REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

CORRELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO VEGETATIVO DO COENTRO HIDROPÔNICO E OS GRAUS DIAS ACUMULADOS

CORRELATION BETWEEN HYDROPONIC CILANTRO VEGETATIVE GROWTH AND ACCUMULATED GROWING DEGREE DAYS

CORRELACIÓN ENTRE EL CRECIMIENTO VEGETATIVO DEL CILANTRO HIDROPÓNICO Y LOS GRADOS DÍA ACUMULADOS

Neiton Silva Machado
Doutor em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, Brasil.
neiton.machado@univasf.edu.br

Luis Vinícius Campos Cunha
Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, Brasil.
luis.cunha@discente.univasf.edu.br

Felipe Rodrigues Freire
Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, Brasil.
feliperodrigues9526@gmail.com

Adriano Victor Lopes da Silva
Doutor em biometria e estatística aplicada, Universidade Federal do Vale do São Francisco – Univasf, Brasil.
adriano.victor@univasf.edu.br

Fábio Freire de Oliveira
Doutor em técnicas energéticas e nucleares, Instituto Federal do Sertão Pernambucano – IFSertãoPE, Brasil
fabio.freire@ifsertao-pe.edu.br

RESUMO:
O presente estudo teve como objetivo avaliar o crescimento vegetativo do coentro (*Coriandrum sativum* L.) cultivado em sistema hidropônico NFT (Nutrient Film Technique) no Vale do São Francisco, correlacionando variáveis morfológicas e físico-químicas com os Graus-Dias Acumulados (GDA). O experimento foi conduzido em ambiente protegido, em delineamento inteiramente casualizado, com dez coletas realizadas em intervalos de 48 horas. Foram analisados o diâmetro do caule (DC), o teor de água, o teor de matéria seca, o teor de matéria mineral e o teor de material orgânico no caule e no limbo, além da composição elementar (teores de carbono, hidrogênio e oxigênio) das partes aéreas. Variáveis climáticas também foram monitoradas, incluindo temperatura do ar e umidade relativa nos ambientes interno e externo da instalação. Os resultados demonstraram que o GDA atuou como variável integradora altamente sensível às respostas da planta, apresentando correlações consistentes com variáveis estruturais e fisiológicas. O DC destacou-se como o indicador morfológico mais robusto, exibindo correlação significativa com os GDA ($r = 0,792$) e ajustando-se adequadamente aos modelos linear e exponencial, reforçando seu papel na sustentação e distribuição de biomassa em sistemas NFT. A dinâmica dos teores de material mineral e orgânico indicou um processo progressivo de maturação estrutural, caracterizado pelo aumento da fração mineral e redução da fração orgânica, evidenciando o avanço da lignificação ao longo do ciclo. O ajuste de modelos bidimensionais e tridimensionais permitiu a identificação da zona térmica de máximo desempenho fisiológico. Os modelos logísticos apresentaram os melhores ajustes para massa fresca ($R^2 = 0,818$) e massa seca ($R^2 = 0,781$), enquanto o modelo tridimensional Gaussiano — relacionando massa seca, diâmetro e massa fresca — exibiu desempenho superior ($R^2 = 0,800$). Os pontos ótimos identificados entre 218 e 227 ºC·dia indicam que o coentro apresenta uma faixa térmica relativamente estreita na qual maximiza a conversão de energia luminosa e térmica em biomassa.
Palavras-chave: Coriandrum sativum L; Correlação de Pearson; Composição elementar.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

ABSTRACT:
The present study aimed to evaluate the vegetative growth of cilantro (Coriandrum sativum L.) cultivated in an NFT (Nutrient Film Technique) hydroponic system in the São Francisco Valley, correlating morphological and physicochemical variables with Accumulated Growing Degree Days (GDD). The experiment was conducted in a protected environment under a completely randomized design, with ten sampling events carried out at 48-hour intervals. The variables analyzed included stem diameter (SD), water content, dry matter content, mineral matter content, and organic matter content in the stem and leaf blade, in addition to the elemental composition (carbon, hydrogen, and oxygen contents) of the aerial parts. Climatic variables were also monitored, including air temperature and relative humidity inside and outside the facility. The results showed that GDD functioned as a highly sensitive integrative variable for plant responses, exhibiting consistent correlations with structural and physiological attributes. Stem diameter emerged as the most robust morphological indicator, showing a significant correlation with GDD ($r = 0.792$) and fitting well to both linear and exponential models, reinforcing its role in biomass support and distribution in NFT systems. The dynamics of mineral and organic matter contents indicated a progressive structural maturation process, characterized by increasing mineral fractions and decreasing organic fractions, evidencing advancing lignification throughout the growth cycle. The adjustment of bidimensional and tridimensional models enabled the identification of the thermal zone associated with maximum physiological performance. Logistic models provided the best fits for fresh mass ($R^2 = 0.818$) and dry mass ($R^2 = 0.781$), while the tridimensional Gaussian model—relating dry mass, stem diameter, and fresh mass—showed superior performance ($R^2 = 0.800$). Optimal points identified between 218 and 227 °C·day indicate that cilantro has a relatively narrow thermal range in which it maximizes the conversion of light and thermal energy into biomass.
Keywords: Coriandrum sativum L; Pearson correlation; Elementary composition.

RESUMEN:
El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el crecimiento vegetativo del cilantro (Coriandrum sativum L.) cultivado en un sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) en el Valle del São Francisco, correlacionando variables morfológicas y fisicoquímicas con los Grados-Día Acumulados (GDA). El experimento se llevó a cabo en un ambiente protegido, bajo un diseño completamente al azar, con diez muestreos realizados a intervalos de 48 horas. Se analizaron el diámetro del tallo (DT), el contenido de agua, el contenido de materia seca, el contenido de materia mineral y el contenido de material orgánico en el tallo y el limbo, además de la composición elemental (niveles de carbono, hidrógeno y oxígeno) de las partes aéreas. También se monitorearon variables climáticas, incluyendo la temperatura del aire y la humedad relativa en los ambientes interno y externo de la instalación.
Los resultados demostraron que el GDA actuó como una variable integradora altamente sensible a las respuestas de la planta, presentando correlaciones consistentes con variables estructurales y fisiológicas. El DT se destacó como el indicador morfológico más robusto, exhibiendo una correlación significativa con los GDA ($r = 0,792$) y ajustándose adecuadamente a los modelos lineal y exponencial, lo que refuerza su papel en la sustentación y distribución de la biomasa en sistemas NFT. La dinámica de los contenidos de material mineral y orgánico indicó un proceso progresivo de maduración estructural, caracterizado por el aumento de la fracción mineral y la reducción de la fracción orgánica, evidenciando el avance de la lignificación a lo largo del ciclo. El ajuste de modelos bidimensionales y tridimensionales permitió identificar la zona térmica de máximo desempeño fisiológico. Los modelos logísticos presentaron los mejores ajustes para la masa fresca ($R^2 = 0,818$) y la masa seca ($R^2 = 0,781$), mientras que el modelo tridimensional Gaussiano —relacionando masa seca, diámetro y masa fresca— exhibió un desempeño superior ($R^2 = 0,800$). Los puntos óptimos identificados entre 218 y 227 ºC·día indican que el cilantro presenta un intervalo térmico relativamente estrecho en el cual maximiza la conversión de energía lumínica y térmica en biomasa.
Palabras clave: *Coriandrum sativum* L.; Correlación de Pearson; Composición elemental.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

INTRODUÇÃO

O coentro (*Coriandrum sativum* L.) é uma hortaliça folhosa e aromática da família Apiaceae, adaptada a regiões de clima quente, com melhor desenvolvimento em temperaturas acima de 25 °C. Morfologicamente, apresenta caule ereto e ramificado, folhas bipinadas e flores brancas em umbelas, atingindo de 30 a 70 cm de altura. A colheita ocorre entre 30 e 40 dias após o plantio, antes do pendoamento. Sua rusticidade e ampla adaptação a diferentes sistemas de cultivo — convencional, orgânico, protegido, fertirrigado e hidropônico — favorecem o uso em cultivos intensivos e a geração de renda para pequenos produtores (NUNES *et al*., 2007; REIS *et al*., 2016; SOARES *et al*., 2017; SANTOS *et al*., 2023).

Apesar de sua importância socioeconômica, o coentro ainda carece de dados estatísticos nacionais devido à produção concentrada em pequenas propriedades e à ausência de fluxo exportador, o que limita informações consolidadas e restringe as análises a estimativas locais (REIS; LOPES, 2016). Nesse contexto, a hidroponia desponta como alternativa tecnológica sustentável para hortaliças de ciclo curto, oferecendo maior produtividade, economia de água e controle ambiental e nutricional (FURLANI, 1998; BEZERRA NETO; BARRETO, 2014).

A eficiência desse sistema depende do entendimento das relações entre o crescimento vegetal e as condições térmicas, sendo a temperatura um fator determinante na taxa de crescimento e acúmulo de biomassa. O uso dos Graus-Dias Acumulados (GDA) permite quantificar esse efeito e modelar a fenologia, auxiliando na previsão da colheita e no manejo do cultivo (VILLA NOVA *et al*., 1972; MONTEIRO, 2009). Estudos que correlacionam variáveis biométricas com os GDA subsidiam o ajuste de modelos matemáticos sigmoidais (logístico, Gompertz, Richards etc), que descrevem o crescimento e definem faixas térmicas ideais para maximizar a produção hidropônica (CAMPOS, 2004; CARMO, 2022).

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o crescimento vegetativo do coentro cultivado em sistema hidropônico no Vale do São Francisco, quantificando variáveis morfofisiológicas e físico-químicas da parte aérea, estimando sua composição elementar (C, H e O) e analisando suas relações com o acúmulo de graus-dias. Além disso, buscou-se estabelecer correlações entre essas variáveis e ajustar modelos de crescimento, lineares e não lineares, com foco no diâmetro do caule ao longo do desenvolvimento da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

Local e condições experimentais

O experimento foi conduzido na unidade Hidroponia Sal da Terra, localizada no município de Petrolina, Pernambuco (9°22’44” S; 40°32’47” O), em ambiente protegido por viveiro telado com 35 % de sombreamento. Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima do tipo BSh’, caracterizado como semiárido de estepe quente, com baixa umidade e elevada insolação (JÚNIOR; LIMA; CAVALCANTE, 2015).

Antes da semeadura, realizou-se a higienização do sistema de cultivo para prevenir contaminações por patógenos. O procedimento consistiu na recirculação noturna de solução contendo 40 ppm de cloro ativo, obtida pela diluição de 200 mL de água sanitária comercial a 2 % de cloro em 100 L de água (LOPES; CARRIJO; MAKISHIMA, 2005).

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

A solução nutritiva utilizada correspondeu à formulação empregada comercialmente pela unidade (Tabela 1). O reabastecimento foi realizado diariamente, ou sempre que a condutividade elétrica (CE) apresentava valores inferiores ao intervalo ideal de 2,0 a 2,2 dS m^{-1}. O sistema operou em recirculação contínua, com bomba acionada em ciclos automáticos de 6 min ligados e 4 min desligados, assegurando vazão de 2000 L h^{-1} — equivalente a 200 L de solução circulante por ciclo. A CE e o pH da solução nutritiva foram monitorados diariamente.

Tabela 1 – Solução nutritiva utilizada pela hidroponia Sal da Terra, cuja finalidade é oferecer desenvolvimento pleno do coentro durante todo o ciclo.

Reservatório		Soluções para reposição	Massa (g)
A	40 L	Sulfato de potássio	5332,8
		MAP	2960
B	40 L	Nitrato amônio	2626
		Nitrato de cálcio	9500
		Cloreto de potássio	1500
C	10 L	Sulfato de magnésio	2460
		Sulfato de manganês	24
		Sulfato de zinco	23
		Sulfato de cobre	3,8
		Ácido bórico	37
		Molibdato de amônio	2,4
D	10 L	Sulfato de ferro	224
		EDTA	297,6

Produção das mudas e condução do cultivo

Utilizaram-se sementes de coentro (*Coriandrum sativum* L.) cultivar Verdão, de procedência comercial e adquiridas pela própria unidade hidropônica. As sementes, previamente tratadas com fungicidas, apresentavam pureza de 99,9 % e germinação mínima de 95 %.

A semeadura foi realizada em 30 de setembro de 2023, em bandejas contendo vermiculita comercial como substrato (Figura 1). Cada célula recebeu cinco sementes, visando maior uniformidade e taxa de emergência. No total, foram utilizadas 576 células, com as sementes posicionadas entre duas camadas de substrato.

O transplante das mudas ocorreu em 5 de outubro de 2023, cinco dias após a semeadura, para canais hidropônicos do tipo NFT (Nutrient Film Technique). A bancada experimental foi composta por dois canais de 12 m de comprimento (dois tubos de 6 m), com orifícios de 40 mm de diâmetro, espaçados a 0,15 m, totalizando 32 orifícios por tubo. O espaçamento entre canais também foi de 0,15 m. Duas mudas por orifício foram transplantadas.

As avaliações iniciaram, considerando cinco plantas por repetição. Foram realizadas dez avaliações, com intervalos de 48 h. Durante o período experimental, monitoraram-se a temperatura e a umidade relativa do ar no interior do viveiro telado por meio de termo-higrômetro digital.

Após cada coleta, as amostras (cinco repetições) foram acondicionadas em sacos de papel tipo Kraft e transportadas ao Laboratório de Olericultura do Campus de Ciências Agrárias (UNIVASF). No laboratório, as plantas foram retiradas das embalagens, cortadas na base do caule, com descarte do sistema radicular e lavagem da região de corte para remoção de resíduos do substrato. Foram mensurados o número de plantas e o diâmetro do caule (paquímetro digital).

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Em seguida, os caules e as folhas foram separados, acondicionados individualmente em sacos tipo Kraft, pesados em balança analítica e secos em estufa de ventilação forçada a 65 °C por 72 h, até obtenção de massa seca constante.

Os dados de temperatura do ar foram obtidos por meio de estação meteorológica automática instalada no Campus de Ciências Agrárias (CCA-UNIVASF). O acúmulo térmico (graus-dia acumulados – GDA) foi determinado conforme a equação:

$$\mathrm{GDA} = \Sigma\left[\left(\left(\frac{\mathrm{Tx}+\mathrm{Tn}}{2}\right)-\mathrm{Tb}\right)\right] \qquad \text{Equação 1}$$

Em que:

Tx = temperatura máxima do ar, Tn = temperatura mínima do ar e Tb = temperatura base inferior (SOUZA; MOURA; SILVA; SOARES; SANTOS, 2007). Para Tb utilizou-se o valor de 10ºC, sendo a temperatura mínima tolerante para o desenvolvimento do coentro (MASABNI; LILLARD, 2011).

Figura 1 – Ilustração fotográfica dos procedimentos experimentais de campo da semeadura a colheita do coentro hidropônico. **A)** Distribuição das sementes nas células da bandeja; **B)** Cobrimento das sementes com o substrato vermiculita; **C)** Verificação da germinação das sementes; **D)** Plantio nas canaletas; **E)** Detalhe das mudas de duas células da bandeja a serem inseridas na canaleta; **F)** Detalhe do desenvolvimento das mudas plantadas na canaleta; **G)** Determinação da temperatura e umidade relativa do telado; **H)** Detalhe das plantas que foram colhidas e conduzidas ao laboratório para análise; **I)** Vista geral das linhas de plantio do experimento

A **B** **C**



REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23



Fonte: Arquivo pessoal dos autores

Análises laboratoriais

As análises seguiram o *Manual de Análise de Resíduos Sólidos e Águas Residuárias* (MATOS, 2015), adotando práticas rigorosas de manipulação, incluindo o uso de pinça metálica para evitar contaminações. As amostras, previamente secas em estufa a 65 °C por 72 h, foram trituradas e acondicionadas em cadinhos calcinados, sendo registradas as massas úmida (Mu) e seca (Ms) em balança analítica.

Após essa etapa, os cadinhos foram submetidos à calcinação em mufla a 550 °C por 4 h. O resfriamento ocorreu inicialmente em chapa aquecida (100 °C) para evitar choque térmico, seguido por armazenamento em dessecador até estabilização térmica, permitindo a obtenção da massa após combustão (Mc).

Com os valores de Mu, Ms, Mc e da massa do recipiente (Mr), calcularam-se os teores de Matéria Seca (TMS), Material orgânico (TMO) e Matéria Mineral (TMM).

Visando determinar a composição elementar (Carbono-C, Hidrogênio-H e Oxigênio-O) foi utilizada a metodologia proposta por Parikh *et al*. (2005) e Parikh *et al*. (2007) sugerida por Oliveira (2010) respectivamente, as quais descrevem as

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

equações 1, 2 e 3 baseadas na análise preliminar de todo espectro de materiais sólidos lignocelulósicos.

$C = 0{,}637.TMM + 0{,}455.TMO$ Equação 2

$H = 0{,}052.TMM + 0{,}062.TMO$ Equação 3

$O = 0{,}304.TMM + 0{,}476.TMO$ Equação 4

Em que: C = Teor de carbono, (%); H = Teor de hidrogênio, (%); O = Teor de oxigênio (%); TMM = Teor de Material Mineral; TMO= Teor de Material Orgânico

Análise estatística

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). A normalidade dos dados e dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Levene. Em seguida, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) para identificar diferenças significativas entre as variáveis independentes nos distintos períodos de coleta.

A comparação entre os órgãos vegetais (caule e limbo) foi realizada por meio do teste t de Student, adotando-se o desvio padrão como medida de dispersão. A distribuição e o comportamento dos dados foram examinados por histogramas de frequência, gráficos boxplot e matriz de correlação de Pearson. Todas as análises estatísticas foram conduzidas nos softwares SigmaPlot 11 e SPSS 13.

Com base nas correlações de Pearson, ajustaram-se modelos bidimensionais e tridimensionais, lineares e não lineares, relacionando as variáveis de crescimento do coentro aos graus-dia acumulados (GDA). A seleção do modelo mais adequado considerou o coeficiente de determinação (R^2), empregado como indicador da proporção da variabilidade explicada pelo modelo e, portanto, como medida do seu ajuste global.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

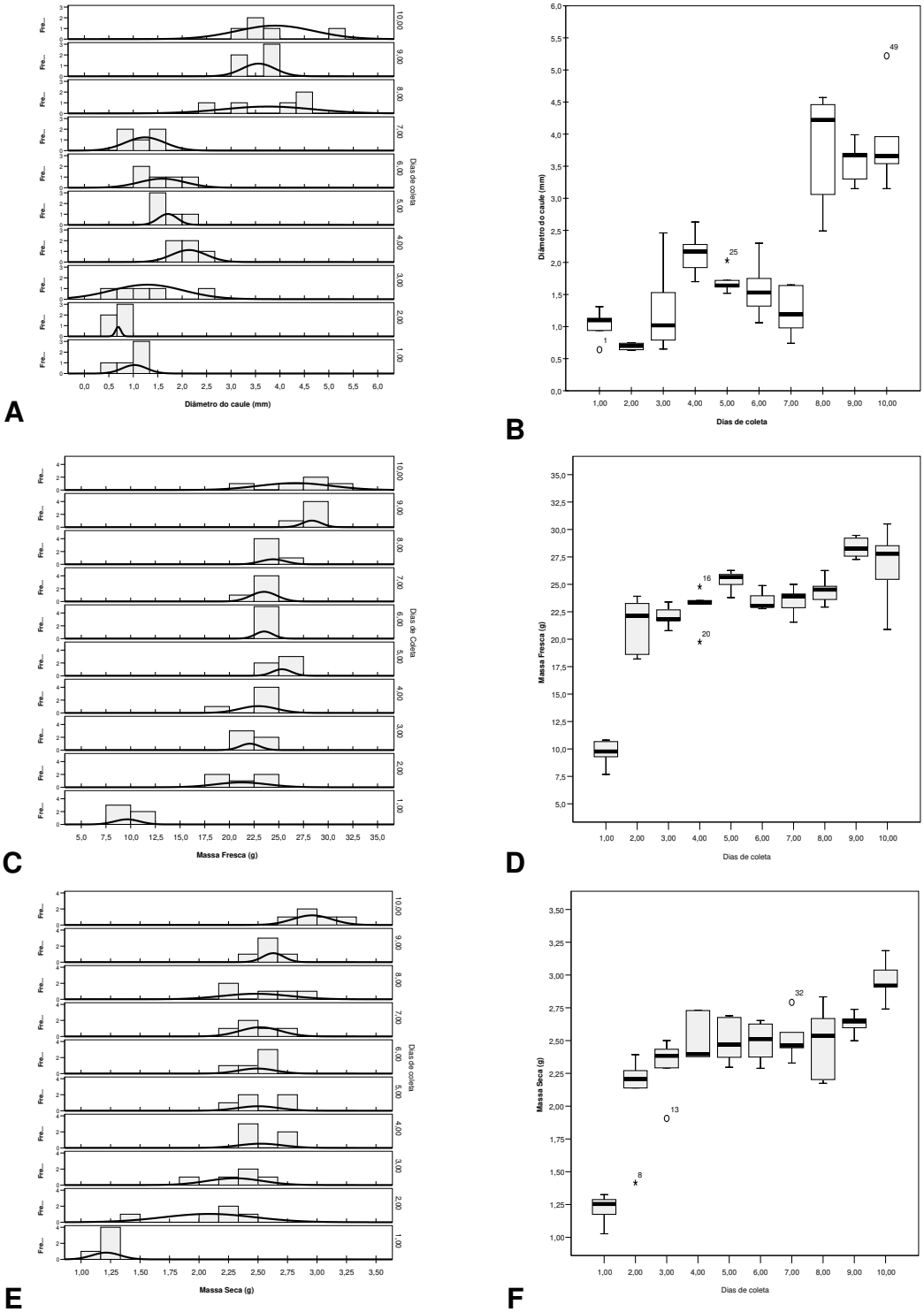
Verificação de normalidade e inspeção gráfica

Para avaliar a adequação dos dados às premissas de normalidade exigidas pelos testes paramétricos, aplicou-se análise de frequência por meio de histogramas com sobreposição da curva normal teórica (Figura 2). Essa representação gráfica possibilita visualizar como as observações se distribuem em torno da média, evidenciando assimetrias, dispersão e a presença de valores extremos (outliers). Tal abordagem é amplamente empregada em estudos agronômicos para diagnosticar a conformidade dos dados às hipóteses estatísticas subjacentes (MIOT, 2017).

Os histogramas das variáveis morfológicas e fisiológicas mostraram distribuição aproximadamente normal na maior parte dos casos, com concentração das observações ao redor da média e dispersão mais moderada nas extremidades. Esse padrão sugere que os dados atendem razoavelmente à suposição de normalidade e indicam que inferências baseadas em testes paramétricos podem ser aplicadas com grau aceitável de confiabilidade (FREITAS, 2022).

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Figura 2 - Distribuição de frequência com sobreposição da curva normal e gráficos BoxPlot para as variáveis que apresentaram correlação significativa com os graus dias acumulados. **A)** Distribuição de frequência e curva normal do diâmetro do caule; **B)** Boxplot do diâmetro do caule; **C**) Distribuição de frequência e curva normal da massa fresca; **D)** Boxplot da massa fresca; **E)** Distribuição de frequência e curva normal da massa seca; F) Boxplot da massa seca.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Entretanto, vale destacar que histogramas são ferramentas visuais e não suficientes isoladamente para comprovar normalidade; o uso concomitante de testes estatísticos formais (como Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov ou Jarque-Bera) é recomendado para confirmar rigorosamente essa condição (WILCOX, 2023).

Como etapa complementar de diagnóstico, foram construídos gráficos do tipo boxplot (Figura 2), que permitem visualizar, de modo resumido, a dispersão dos dados, a mediana, os quartis e possíveis valores extremos (outliers). Essa visualização é útil para detectar assimetrias e discrepâncias de forma rápida e eficaz (VALLADARES NETO *et al*., 2017). No contexto do presente estudo, os boxplots revelaram o padrão de variação do diâmetro do caule e das demais variáveis morfológicas ao longo dos tratamentos térmicos (graus-dia acumulados, GDA), auxiliando na escolha dos modelos matemáticos de ajuste e aportando coerência estatística à etapa de modelagem e regressão.

Essas etapas exploratórias (histograma + boxplot) são fundamentais como procedimento de diagnóstico da qualidade dos dados antes da aplicação de técnicas inferenciais, garantindo maior robustez às interpretações.

COMPARAÇÃO ENTRE ÓRGÃOS VEGETATIVOS: CAULE VS LIMBO FOLIAR

Teor de água e Teor de Matéria Seca

As análises comparativas entre caule e limbo foliar revelaram diferenças funcionais coerentes com seus papéis fisiológicos. No caule, observou-se alta estabilidade hídrica: valores concentraram-se entre 92,0 % e 96,0 %, com mediana de 94,5 % e intervalo interquartílico (IQR) estreito. Essa baixa dispersão corrobora a função do caule como reservatório e condutor hídrico, assegurando suporte e transporte de água mesmo diante de variações ambientais. Por outro lado, o limbo foliar apresentou amplitude mais ampla de variação (77,5 % a 92,0 %), mediana de 86,0 % e presença de outliers expressivos, o que indica maior suscetibilidade desse órgão às microvariações ambientais (TAIZ *et al*., 2017).

No que tange ao teor de matéria seca (sólidos totais), o limbo foliar apresentou maior concentração e dispersão - mediana de 16,0 %, intervalo de 10,0 % a 22,5 % - em relação ao caule- mediana de 13,0 %, intervalo de 10,0 % a 16,0 %. Esse padrão reflete a intensa atividade metabólica foliar, responsável pela síntese de compostos como açúcares e aminoácidos através da fotossíntese. A presença de outliers superiores no limbo sugere variabilidade na eficiência fotossintética e absorção de nutrientes entre plantas individuais, um fenômeno também observado em sistemas hidropônicos (PAULUS *et al*., 2012; CHOWDHURY; ASIABANPOUR, 2024).

Teor de material orgânico, mineral e composição elementar

A análise das frações orgânicas e mineral (voláteis e fixas) evidenciou maior heterogeneidade metabólica no limbo. O teor de material orgânico (sólidos voláteis) no limbo apresentaram ampla dispersão - 20 % a 100 % - e presença de múltiplos outliers superiores, apontando que algumas plantas acumularam compostos orgânicos solúveis em níveis muito superiores à média. Essa variabilidade pode refletir respostas adaptativas a fatores ambientais, como diferenças de luz ou circulação da solução nutritiva (WU *et al*., 2025).

A composição elementar dos tecidos (C, H, O) confirmou o contraste funcional entre caule e limbo: o caule apresentou mais carbono - indicativo de estrutura – enquanto o limbo demonstrou maior participação em oxigênio - metabolismo ativo. A

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

presença de outliers nessa composição química sugere que indivíduos específicos foram submetidos a estresses localizados ou encontravam-se em diferentes estágios fenológicos, modificando seu balanço bioquímico (BEZERRA, R.R. *et al*., 2022).

Heterogeneidade, outliers e abordagem estatística

A ocorrência frequente de outliers — inclusive no diâmetro do caule, que variou de 0,6 mm a 5,2 mm — merece atenção cuidadosa (Figura 2A). Esses pontos discrepantes não devem ser considerados meramente erros de medição ou digitação, mas sim reflexo de indivíduos que divergiram significativamente do padrão central de crescimento e composição. Estatisticamente, valores extremos podem distorcer estimativas de média e variância, comprometendo a validade de testes paramétricos (MAIA LIMA *et al*., 2018).

Contudo, os outliers também contêm informação biológica relevante, indicando heterogeneidade no vigor das plantas, possivelmente causada por variações no fluxo da solução nutritiva, oxigenação, microclima (luz, ventilação) ou diferença genética residual (BAIYIN, *et al*., 2021, CHOWDHURY; ASIABANPOUR, 2024). Assim, a identificação e análise desses valores atípicos colaboram como ferramenta diagnóstica do sistema, sinalizando possíveis falhas operacionais (p. ex. entupimentos, distribuição irregular de nutrientes ou oxigênio) que comprometem a uniformidade do cultivo.

Para lidar com os outliers e proteger as inferências estatísticas, recomenda-se o uso de estatísticas robustas (mediana, métodos não paramétricos, estimadores robustos) em futuras análises (WILCOX, 2023). No campo da estatística moderna, há um ressurgimento do interesse por técnicas robustas que resistem à presença de observações extremas, uma vez que tais abordagens minimizam o viés induzido por outliers e melhoram a precisão das estimativas (LOH, 2025). Métodos recentes de detecção de outliers iterativos, como Tukey-Pearson residual (TPR) e seus variantes, também são promissores para sistemas biológicos e podem aprimorar a filtragem de dados extremos (KONG *et al*., 2015).

DINÂMICA TEMPORAL: CRESCIMENTO, COMPOSIÇÃO E AMBIENTE

Evolução do caule

O diâmetro do caule (DC) variou de 0,7 a 3,9 mm ao longo dos dez dias analisados (Figura 2A e 2B), indicando crescimento progressivo da planta conforme o acúmulo térmico (GDA). O teor de água no caule (TAC) manteve-se relativamente estável (~ 92–93 %), enquanto os Teores de Matéria Seca no Caule (TMSC) variaram de 6,6 % a 9,3 %. Observou-se uma redistribuição entre frações voláteis (Teor de Matéria Orgânica no Caule - TMOC) e fixas (Teor de Matéria Mineral no Caule - TMMC): nos primeiros dias a proporção era de ~ 77/23, deslocando-se para ~ 64/36 no dia 9, o que sugere mudança na composição bioquímica interna e possível lignificação gradual.

No que tange à composição elementar, os teores de carbono (TCC), hidrogênio (THC) e oxigênio (TOC) no caule permaneceram estáveis (≈ 49–50 %, 6 %, 43–44 %, respectivamente), o que indica que, embora o caule estivesse se tornando mais denso, sua estrutura química elementar manteve-se proporcionalmente constante.

Variações no limbo foliar

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

O limbo foliar apresentou oscilações mais acentuadas: o teor de água (TAL) variou entre 83,9 % e 89,2 %, enquanto os Teores de Matéria Seca no Limbo (TMSL) oscilaram de 10,8 % a 16,1 %. A composição entre Teores de Material Orgânico no Limbo (TMOL) e Teores de Material Mineral no Limbo (TMML) mostrou comportamento dinâmico: no dia 4, TMOL atingiu 68,4 % e TMML 31,6 %, contrastando com outros dias em que TMOL chegou a 83,0 %. Isso indica intensa plasticidade metabólica foliar.

Quanto aos teores de carbono, hidrogênio e oxigênio no limbo (TCL, THL, TOL), os valores foram similares aos do caule (cerca de 49–51 % C, ~6 % H, ~42–44 % O), o que evidencia que as variações observadas são mais atribuíveis à proporção água/solidez do que a alterações na constituição elementar da biomassa.

Ambiente microclimático

As variáveis ambientais seguiram tendências esperadas: a temperatura interna do telado (TT) variou de 29,7°C a 40,4°C, e o GDA aumentou consistentemente (de 12,9 a 267,1). A umidade relativa interna (URT) oscilou entre 41,4 % e 56,5 %, acompanhando as variações térmicas. O aumento contínuo de GDA impulsionou o desenvolvimento vegetal, ao passo que oscilações na URT influenciaram ajustes fisiológicos visíveis nas flutuações de TAL e TMSL.

No conjunto, os dados indicam que o acúmulo térmico foi o principal motor do crescimento do caule (maior DC correlacionado ao aumento de GDA), enquanto a redistribuição hídrica e sólida nos tecidos representou resposta adaptativa da planta às condições ambientais controladas.

ANÁLISES ESTATÍSTICAS INFERENCIAIS E CORRELAÇÕES

Correlação de Pearson

A correlação de Pearson (Tabela 2) foi empregada para quantificar associações lineares entre variáveis morfológicas/fisiológicas e o acúmulo térmico (GDA).Existem diversas classificações semelhantes para interpretar a magnitude do coeficiente de correlação de Pearson (r), todavia adotamos a classificação elaborada por Parreira (2018) adaptada de Callegari-Jacques (2003) e Dancey (2006), no qual:

$0 \leq r \leq |0,1|$ (nula);
$|0,1| < r \leq |0,3|$ (fraca);
$|0,3| < r \leq |0,6|$ (moderada);
$|0,6| < r \leq |0,9|$ (forte);
$|0,9| < r < |1|$ (muito forte);
$r = 1$ (perfeita positiva).

A matriz de correlação revelou:r = 0,792 entre diâmetro do caule (DC) e GDA, indicando forte influência do acúmulo térmico sobre o espessamento da estrutura vegetal;

Esse resultado indica que o acúmulo térmico atua como variável integradora do crescimento vegetativo, afetando simultaneamente o espessamento do caule, expansão foliar e balanço hídrico. A matriz de correlação forneceu subsídios na seleção de variáveis independentes para os modelos de regressão, reforçando a coerência entre estatística e biologia.

Análise de variância (ANOVA)

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Aplicou-se ANOVA para verificar diferenças entre os dias de coleta nas variáveis morfofisiológicas e microclimáticas e em seguida o teste de Tukey para comparações múltiplas (Tabela 3):

O diâmetro do caule apresentou diferença altamente significativa entre os dias ($F = 26,42$; $p < 0,001$), evidenciando o papel do acúmulo térmico sobre o espessamento estrutural.

Teor de água e Teor de Matéria Seca do caule não apresentaram diferença significativa ($p = 0,238$), indicando estabilidade hídrica no caule.

O teor de hidrogênio no caule apresentou diferença significativa ($F = 2,582$; $p = 0,019$), sugerindo ajustes químicos sutis com o avanço térmico.

As variáveis TMOC, TMMC, TCC e TOC mostraram tendência à significância ($0,067 < p < 0,070$), indicando possíveis ajustes metabólicos discretos.

No limbo, teor de água e matéria seca evidenciaram diferenças significativas entre tratamentos ($F = 3,225$; $p = 0,005$), reforçando a sensibilidade foliar às variações térmicas e demanda evaporativa.

Demais variáveis do limbo (TCL, THL, TOL) não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$), denotando estabilidade composicional.

Os parâmetros microclimáticos (TT, URT, TE e GDA) exibiram $p < 0,001$, confirmando diferenças expressivas entre ambientes e períodos experimentais.

Esses achados demonstram que crescimento e composição do caule e limbo foram modulados pelas variações térmicas, sendo o diâmetro do caule a variável mais responsiva às condições microclimáticas, o que reforça sua importância como indicador morfofisiológico do desenvolvimento térmico.

Teste t de Student (comparação entre caule e limbo)

Para comparar atributos como diâmetro, teor de água, e teores de matéria seca entre caule e limbo, aplicou-se o teste t de Student - pares independentes – (Tabela 4). Os resultados destacaram

Teor de água significativamente maior no caule que no limbo (diferença média = 6,48 %; $t = 20,78$; $p < 0,001$), refletindo a função hídrica do caule.

Teores de Matéria seca mostraram comportamento inverso (diferença média = –6,48 %; $t = –20,78$; $p < 0,001$), evidenciando maior concentração metabólica no limbo.

As frações de sólidos voláteis (Teores de Material Orgânico) e sólidos fixos (Teores de Material Mineral) não apresentaram diferenças significativas entre órgãos ($p > 0,05$).

Na composição elementar, o teor de carbono foi significativamente superior no caule (diferença média = 44,08 %; $t = 253,20$; $p < 0,001$), enquanto o hidrogênio foi maior no limbo (diferença média = –43,70 %; $t = –109,97$; $p < 0,001$). O oxigênio não apresentou variação significativa ($p = 0,410$), indicando equilíbrio estrutural.

Por último, a temperatura média no telado foi significativamente superior à registrada em estação meteorológica ($t = 7,79$; $p < 0,001$), evidenciando o efeito microclimático do cultivo protegido.

Esses resultados reforçam a existência de diferenciação funcional e anatômica entre caule e limbo, compatível com seus papéis distintos no metabolismo e na adaptação térmica da planta.

O diâmetro do caule do coentro apresentou aumento consistente em função do acúmulo térmico, evidenciando forte relação entre o crescimento vegetativo e os graus-dias acumulados (GDA).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Tabela 2 - Valores do coeficiente de correlação de Pearson

	DC	TAC	TMSC	TMOC	TMMC	TCC	THC	TOC	TAL	TMSL	TMOL	TMML	THL	TCL	TOL	TT	URT	TE	GDA	MF	MS
DC	1	-,175	,175	-,269(*)	,269(*)	,264(*)	-,398(**)	-,276(*)	-,043	,043	,084	-,084	-,084	,051	,082	,072	-,114	,448(**)	,792(**)	,512**	,525**
TAC		1	-,999(**)	-,019	,019	,022	,002	-,017	,306(*)	-,306(*)	,024	-,024	-,021	,051	,026	-,120	,124	-,109	-,196	,073	-,305*
TMSC			1	,019	-,019	-,022	-,002	,017	-,306(*)	,306(*)	-,024	,024	,021	-,051	-,026	,120	-,124	,109	,196	-,073	,305*
TMOC				1	-,999(**)	-,999(**)	,936(**)	,999(**)	-,098	,098	-,033	,033	,033	-,032	-,034	,191	-,161	,000	-,244(*)	,221	-,149
TMMC					1	,999(**)	-,936(**)	-,999(**)	,098	-,098	,033	-,033	-,033	,032	,034	-,191	,161	,000	,244(*)	,221	,149
TCC						1	-,935(**)	-,999(**)	,101	-,101	,036	-,036	-,037	,036	,037	-,195	,165	-,002	,241(*)	,221	,147
THC							1	,937(**)	-,096	,096	-,085	,085	,086	-,086	-,086	-,004	,019	-,185	-,303(*)	-,204	-,138
TOC								1	-,089	,089	-,029	,029	,030	-,028	-,031	,191	-,157	,001	-,247(*)	-,221	-,153
TAL									1	-,999(**)	,129	-,129	-,129	,162	,130	,208	-,219	-,282(*)	-,133	,255	-,069
TMSL										1	-,129	,129	,129	-,162	-,130	-,208	,219	,282(*)	,133	-,255	,069
TMOL											1	-,999(**)	-,999(**)	,995(**)	,999(**)	,085	-,144	,054	,031	,040	-,038
TMML												1	,999(**)	-,995(**)	-,999(**)	-,085	,144	-,054	-,031	-,040	,038
THL													1	-,995(**)	-,999(**)	-,084	,142	-,055	-,031	-,040	,038
TCL														1	,995(**)	,084	-,127	,054	-,010	,007	-,087
TOL															1	,084	-,143	,054	,029	,038	-,041
TT																1	-,911(**)	,363(**)	,031	,019	,051
URT																	1	-,151	-,037	-,063	-,083
TE																		1	,540(**)	,031	,081
GDA																			1	,722**	,728**
MF																				1	,874**
MS																					1

* Significativo a 5% de probabilidade; ** Significativo a 1% de probabilidade

Em que:

D = dias de coleta
DC = Diâmetro do Caule
TAC = Teor de Água no Caule
TMSC = Teor de Matéria Seca no Caule
TMOC = Teor de Material Orgânico no Caule
TMMC = Teor de Matéria Mineral no Caule
TCC = Teor de Carbono no Caule
THC = Teor de Hidrogênio no Caule
TOC = Teor de Oxigênio no Caule
TAL = Teor de Água no Limbo
TMSL = Teor de Matéria Seca no Limbo
TMOL = Teor de Material Orgânico no Limbo
TMML = Teor de Matéria Mineral no Limbo
TCL = Teor de Carbono no Limbo
THL = Teor de Hidrogênio no Limbo
TOL = Teor de Oxigênio no Limbo
TT = Temperatura Dentro do Telado
URT = Umidade Relativa Dentro do Telado
TE = Temperatura na Estação Meteorológica
GDA = Graus-Dias Acumulados
MF = Massa Fresca (g)
MS = Massa Seca (g)

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Tabela 3 - Valores das médias e desvios padrões das variáveis analisadas em cada dia de coleta.

D	DC	TAC	TMSC	TMOC	TMMC	TCC	THC	TOC	TAL	TMSL	TMOL	TMML	THL	TCL	TOL	TT	URT	TE	GDA
1	1,0±0,3a	92,6±1,1 a	7,4±1,1 a	77,7±0,4b	22,3±0,4a	49,6±0,1a	6,0±0,0 a	43,8±0,1b	83,9±3,6a	16,1±3,6b	79,9±8,9a	20,1±8,9a	49,2±1,6 a	6,0±0,1 a	44,2±1,5 a	31,8±0, 0	53,3±0, 0	30,9±0, 0	12,9±0,0
2	0,7±0,1a	92,6±1,7 a	7,4±1,7 a	76,1±1,1a b	23,9±1,1a b	49,9±0,2a b	6,0±0,0 a	43,5±0,2a b	89,2±2,2b	10,8±2,2a	79,4±1,5a	20,6±1,5a	49,3±0,3 a	6,0±0,0 a	44,1±0,2 a	40,4±0, 0	41,4±0, 0	29,8±0, 0	36,9±0,0
3	1,3±0,7a b	92,5±0,9 a	7,5±0,9 a	76,8±0,4a b	23,2±0,4a b	49,7±0,1a b	6,0±0,0 a	43,6±0,1a b	86,7±3,0a b	13,3±3,0a b	81,4±0,9a	18,6±0,9a	48,9±0,2 a	6,0±0,0 a	44,4±0,2 a	34,0±0, 0	43,3±0, 0	28,3±0, 0	69,4±0,0
4	2,1±0,4b	92,2±0,6 a	7,8±0,6 a	75,8±0,4a b	24,2±0,4a b	49,9±0,1a b	6,0±0,0 a	43,4±0,1a b	85,8±1,2a b	14,2±1,2a b	68,4±28,1 a	31,6±28,1 a	51,3±5,1 a	5,9±0,3 a	42,1±4,8 a	31,3±0, 0	54,5±0, 0	28,4±0, 0	89,8±0,0
5	1,7±0,2a b	93,4±0,4 a	6,6±0,4 a	75,9±0,6a b	24,1±0,6a b	49,9±0,1a b	6,0±0,0 a	43,5±0,1a b	86,6±1,0a b	13,4±1,0a b	81,4±0,4a	18,6±0,4a	48,9±0,1 a	6,0±0,0 a	44,4±0,1 a	29,8±0, 0	56,5±0, 0	29,5±0, 0	112,0±0, 0
6	1,6±0,5a b	92,6±0,7 a	7,4±0,7 a	76,1±0,5a b	23,9±0,5a b	49,8±0,1a b	6,0±0,0 a	43,5±0,1a b	85,7±1,0a b	14,3±1,0a b	70,0±27,9 a	30,0±27,9 a	51,0±5,0 a	5,9±0,3 a	42,4±4,8 a	35,5±0, 0	44,7±0, 0	29,6±0, 0	146,8±0, 0
7	1,2±0,4a b	92,5±0,3 a	7,5±0,3 a	75,3±0,1a b	24,7±0,1a b	50,0±0,0a b	6,0±0,0 a	43,4±0,0a b	84,7±0,6a	15,3±0,6b	65,3±28,5 a	34,7±28,5 a	51,8±5,2 a	5,9±0,3 a	41,6±4,9 a	32,1±0, 0	55,9±0, 0	31,8±0, 0	172,7±0, 0
8	3,8±0,9c	93,0±0,4 a	7,0±0,4 a	73,9±0,6a b	26,1±0,6a b	50,2±0,1a b	5,9±0,0 a	43,1±0,1a b	85,8±1,7a b	14,2±1,7a b	81,2±1,2a	18,8±1,2a	48,9±0,2 a	6,0±0,0 a	44,4±0,2 a	39,0±0, 0	41,9±0, 0	32,9±0, 0	203,3±0, 0
9	3,6±0,3c	92,7±0,5 a	7,3±0,5 a	64,4±19,6 a	35,6±19,6 b	52,0±3,6b	5,9±0,2 a	41,5±3,3a	87,0±0,6a b	13,0±0,6a b	81,0±0,8a	19,0±0,8a	49,0±0,2 a	6,0±0,0 a	44,3±0,2 a	29,7±0, 0	54,5±0, 0	30,1±0, 0	240,2±0, 0
10	3,9±0,8c	90,7±3,3 a	9,3±3,3 a	78,3±1,7b	21,7±1,7a	49,4±0,3a	6,0±0,0 a	43,9±0,3b	84,7±0,8a	15,3±0,8b	83,0±0,5a	17,0±0,5a	48,6±0,1 a	6,0±0,0 a	44,7±0,1 a	37,0±0, 0	44,0±0, 0	32,0±0, 0	267,1±0, 0

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na coluna não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

Tabela 4 - Valores das médias e desvios padrões das variáveis analisadas após aplicação do teste t de Student

Variáveis independentes (Caule)	Média ± Desvio Padrão	Variáveis independentes (Limbo)	Média ± Desvio Padrão
TAC	92,5a ± 1,4	TAL	86,0b ± 2,2
TMSC	7,5a ± 1,4	TMSL	14,0b ± 2,2
TMOC	75,0a ± 6,8	TMOL	77,1a ± 15,5
TMMC	25,0a ± 6,8	TMML	22,9a± 15,5
TCC	50,0a ± 1,2	TCL	49,7b± 2,8
THC	6,0a ±0,1	THL	6,0a± 0,1
TOC	43,3a ± 1,2	TOL	43,7a± 2,7
TT	34,1a ± 3,6	TE	30,3b ± 1,5

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha indicam que não há diferença estatística, pelo teste t de Student a 5% de probabilidade, entre a variável do caule e do limbo

Em que:

D = dias de coleta
DC = Diâmetro do Caule
TAC = Teor de Água no Caule
TMSC = Teor de Matéria Seca no Caule
TMOC = Teor de Material Orgânico no Caule
TMMC = Teor de Matéria Mineral no Caule
TCC = Teor de Carbono no Caule
THC = Teor de Hidrogênio no Caule
TOC = Teor de Oxigênio no Caule
TAL = Teor de Água no Limbo
TMSL = Teor de Matéria Seca no Limbo
TMOL = Teor de Material Orgânico no Limbo
TMML = Teor de Matéria Mineral no Limbo
TCL = Teor de Carbono no Limbo
THL = Teor de Hidrogênio no Limbo
TOL = Teor de Oxigênio no Limbo
TT = Temperatura Dentro do Telado
URT = Umidade Relativa Dentro do Telado
TE = Temperatura na Estação Meteorológica
GDA = Graus-Dias Acumulados
MF = Massa Fresca (g)
MS = Massa Seca (g)

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

No contexto da hidroponia, a resposta ao acúmulo térmico tende a ser mais nítida, devido ao controle do ambiente e da nutrição mineral (FURLANI, 1998; BEZERRA NETO; BARRETO, 2014). Essa condição favorece o crescimento equilibrado e a redução de variabilidade entre plantas, corroborando estudos que apontam a hidroponia como alternativa eficiente para hortaliças de ciclo curto, como o coentro (REIS; LOPES, 2016; SOARES *et al*., 2017; SANTOS *et al*., 2023). Assim, o uso de modelos de regressão associados aos GDA constitui uma abordagem promissora para descrever o crescimento do coentro e subsidiar práticas de manejo mais precisas na região do Vale do São Francisco.

AJUSTE DE MODELOS DE REGRESSÃO

Os resultados demonstram que o acúmulo térmico influenciou de maneira direta o crescimento vegetativo do coentro hidropônico, afetando tanto a produção de massa quanto o desenvolvimento estrutural da planta. O comportamento observado está de acordo com o descrito por Reis e Lopes (2016), que ressaltam que o coentro apresenta elevada sensibilidade às condições microclimáticas e térmicas, especialmente em sistemas de cultivo intensivo como a hidroponia. De modo geral, os modelos ajustados (Tabela 5 e Figura 3)apresentaram R^2 entre 0,60 e 0,82, valores considerados satisfatórios para estudos agronômicos com plantas de ciclo curto, conforme discutido por Taiz *et al*. (2017).

Modelos bidimensionais – respostas univariadas ao acúmulo de graus-dias

Os modelos logísticos ajustados para massa seca (R^2 = 0,781) e massa fresca (R^2 = 0,818) apresentaram comportamento sigmoidal típico do crescimento vegetal, corroborando a literatura fisiológica clássica (Taiz *et al*., 2017; Larcher, 2004) e estudos aplicados em olerícolas sob hidroponia (Silva *et al*., 2018). A presença de um ponto de inflexão próximo a 16–17 ºC.dia indica a fase de transição entre o crescimento acelerado e a estabilização da biomassa, fenômeno igualmente descrito para coentro e outras folhosas de ciclo rápido por Reis & Lopes (2016) e Costa *et al*. (2019).

O diâmetro do caule ajustou-se tanto ao modelo linear (R^2 = 0,628) quanto ao exponencial (R^2 = 0,661), sendo o segundo mais representativo do comportamento observado. Conforme relatado por Pereira *et al*. (2020), o diâmetro do caule tende a apresentar crescimento contínuo em condições hidropônicas, respondendo principalmente a fatores estruturais, como expansão celular e turgescência, o que justifica a adequação do modelo exponencial.

A massa seca ajustada pelos modelos Gompertz (R^2 = 0,757) e exponencial de três parâmetros (R^2 = 0,763) reforça o padrão assimétrico de crescimento fisiológico relatado por Taiz *et al*. (2017). A presença de um valor inicial (y0) reduzido confirma o padrão típico de hortaliças folhosas em sistemas NFT, como já observado por Silva *et al*. (2018) e Lima *et al*. (2021).

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Tabela 5 Parâmetros dos modelos bidimensionais ajustados

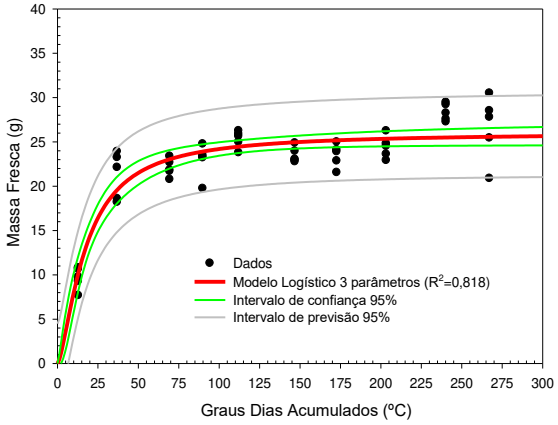
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	p-valor	R^2
Modelo Logístico 3 parâmetros $\rightarrow y = \frac{a}{1+\left(\frac{x}{x0}\right)^b}$ Em que : y = Massa fresca (g); x = Graus Dias Acumulados (ºC)				
a	26,027	0,736	<0,0001	
b	-1,479	0,238	<0,0001	0,818
x0	17,421	1,682	<0,0001	
Modelo Logístico 3 parâmetros $\rightarrow y = \frac{a}{1+\left(\frac{x}{x0}\right)^b}$ Em que : y = Massa seca (g); x = Graus Dias Acumulados (ºC)				
a	2,785	0,120	<0,0001	
b	-1,123	0,222	<0,0001	0,781
x0	15,658	1,986	<0,0001	
Modelo Exponencial 3 parâmetros $\rightarrow y = y0 + a.e^{b.x}$ Em que : y = Massa seca (g); x = Graus Dias Acumulados (ºC)				
y0	0,544	0,265	0,0453	
a	2,069	0,253	<0,0001	0,763
b	0,968	0,006	<0,0001	
Modelo Gompertz 3 parâmetros $\rightarrow y = a.e^{\left(-e^{-\left(\frac{x-x0}{b}\right)}\right)}$ Em que : y = Massa seca (g); x = Graus Dias Acumulados (ºC)				
a	2,599	0,046	<0,0001	
b	24,707	4,867	<0,0001	0,757
x0	5,053	3,727	0,1817	
Modelo Linear $\rightarrow y = a + b.x$ Em que : y = Diâmetro do caule (mm); x = Graus Dias Acumulados (ºC)				
a	0,463	0,211	0,0334	0,628
b	0,012	0,001	<0,0001	
Modelo Exponencial 2 parâmetros $\rightarrow y = a.e^{b.x}$ Em que : y = Diâmetro do caule (mm); x = Graus Dias Acumulados (ºC)				
a	0,837	0,122	<0,0001	0,661
b	0,006	6,744.10-4	<0,0001	

Fonte: Arquivo pessoal dos autores

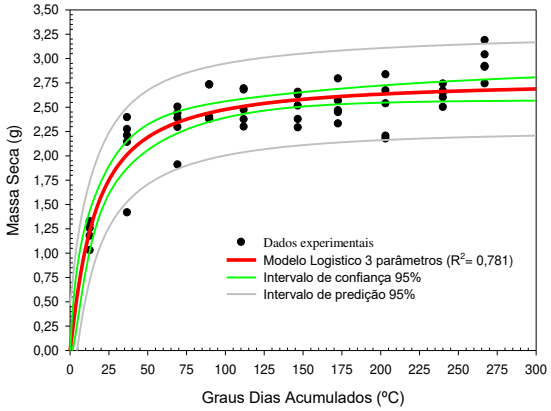
REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Figura 3 - Ilustração gráfica dos modelos bidimensionais ajustados: **A)** Modelo Logístico 3 Parâmetros (R^2 = 0,818) Massa fresca em função do DGA; **B)** Modelo Logístico 3 Parâmetros (R^2 = 0,781) Massa seca em função do DGA; **C)** Modelo Exponencial 3 Parâmetros (R^2 = 0,763) Massa seca em função do DGA; **D)** Modelo Gompertz 3 Parâmetros (R^2 = 0,757) Massa seca em função do DGA; **E)** Modelo Linear (R^2 = 0,628) Diâmetro do caule em função do GDA; **F**) Modelo Exponencial 2 Parâmetros (R^2 = 0,661) Diâmetro do caule em função do DGA

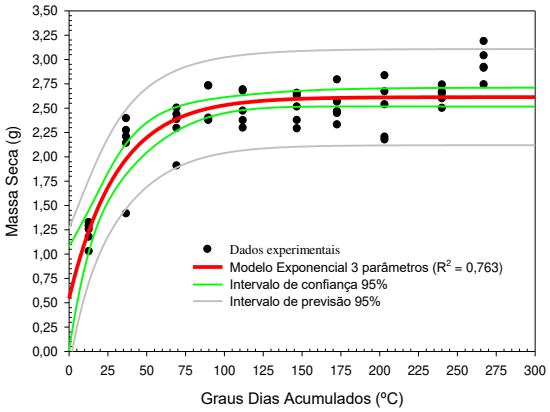
A



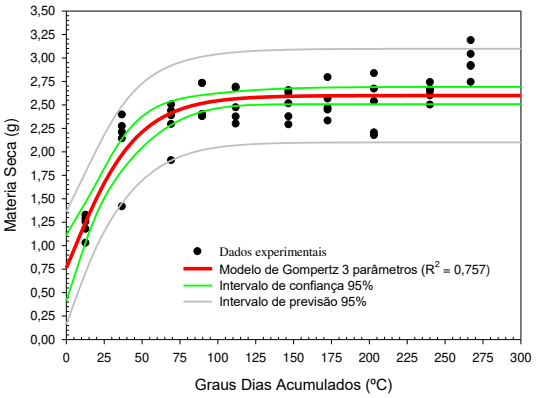
B



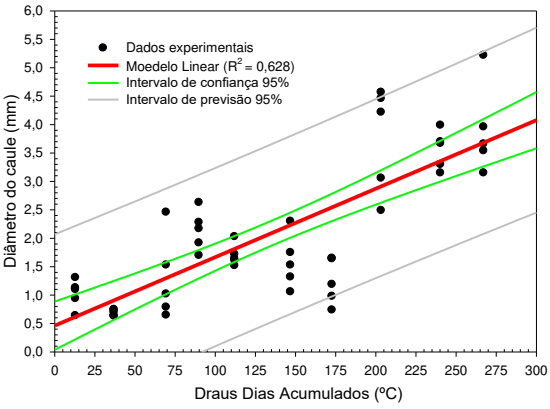
C



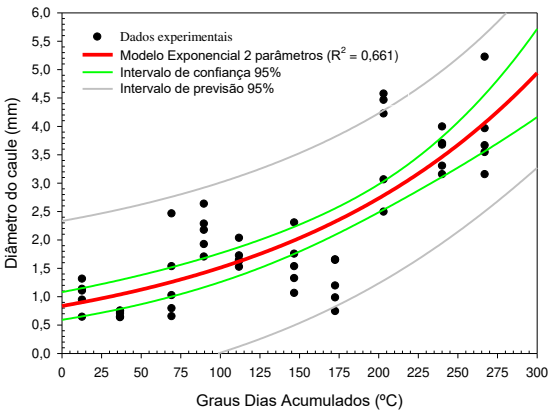
D



E



F



Fonte: Arquivo pessoal dos autores

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Modelos tridimensionais – interações entre variáveis morfológicas e térmicas

Os modelos tridimensionais (Tabela 6 e Figura 4) permitiram compreender de maneira integrada como o acúmulo térmico (graus-dias) interage com variáveis morfológicas como massa fresca e diâmetro do caule. O modelo plano 3D, com R^2 = 0,783, demonstrou que o acúmulo de massa seca ocorre de forma proporcional ao aumento da massa fresca e ao avanço térmico — comportamento amplamente discutido na literatura para folhosas hidropônicas (Reis & Lopes, 2016; Costa *et al*., 2019).

Os modelos Gaussiano 3D apresentaram R^2 entre 0,60 e 0,80, com superfícies que indicam regiões de máximo fisiológico. No primeiro modelo (massa seca × graus-dias × diâmetro), o ponto ótimo ocorreu em torno de x0 ≈ 227 ºC.dia e y0 ≈ 2,8 mm, sugerindo que o coentro apresenta melhor eficiência de conversão térmica antes do alongamento excessivo do caule — fenômeno descrito por Silva *et al*. (2018) e reforçado por estudos sobre fisiologia de crescimento em ambientes protegidos (Taiz *et al*., 2017).

O modelo que relacionou massa seca ao diâmetro e à massa fresca apresentou o melhor desempenho entre os modelos 3D (R^2 = 0,800). Esse resultado confirma a forte correlação entre estrutura de suporte (caule), acúmulo hídrico (massa fresca) e conteúdo de matéria seca, relação já discutida por Larcher (2004) e observada em experimentos com folhosas hidropônicas por Lima *et al*. (2021).

Por fim, o modelo Gaussiano associado à massa fresca apresentou seu ponto ótimo em torno de 219 ºC.dia, reforçando a existência de uma faixa térmica ideal para máxima produtividade, conforme relatado pelos autores que abordam a influência da temperatura sobre a eficiência fotossintética e o balanço hídrico em folhosas (Taiz *et al*., 2017; Costa *et al*., 2019).

Tabela 6 - Parâmetros dos modelos tridimensionais ajustados

Modelo 3D plano $\rightarrow z = a + b.x + c.y^2$ Em que: z = Massa seca (g); x = Graus Dias Acumulados (ºC); y = Massa fresca (g)				
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	p-valor	R^2
a	0,648	0,167	0,0003	
b	0,001	$5{,}782.10^{-4}$	0,0450	0,783
c	0,069	0,009	<0,0001	
Modelo 3D Gaussiano $\rightarrow z = a.e^{-0{,}5\left[\left(\frac{x-x0}{b}\right)^2+\left(\frac{y-y0}{c}\right)^2\right]}$ Em que : z = Massa seca (g); x = Diâmetro do caule (mm); y = Massa fresca (g)				
x_0	4,194	1,702	0,0176	
y_0	29,449	2,558	<0,0001	
a	2,791	0,096	<0,0001	0,800
b	7,531	3,976	0,0647	
c	16,258	2,126	<0,0001	
Modelo 3D Gaussiano $\rightarrow z = a.e^{-0{,}5\left[\left(\frac{x-x0}{b}\right)^2+\left(\frac{y-y0}{c}\right)^2\right]}$ Em que: z = Massa seca (g); x = Graus Dias Acumulados (ºC); y = Diâmetro do caule (mm)				
x_0	226,713	37,388	<0,0001	
y_0	2,792	1,040	0,0101	
a	2,790	0,094	<0,0001	0,601
b	223,167	40,820	<0,0001	
c	6,455	3,676	0,0859	

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

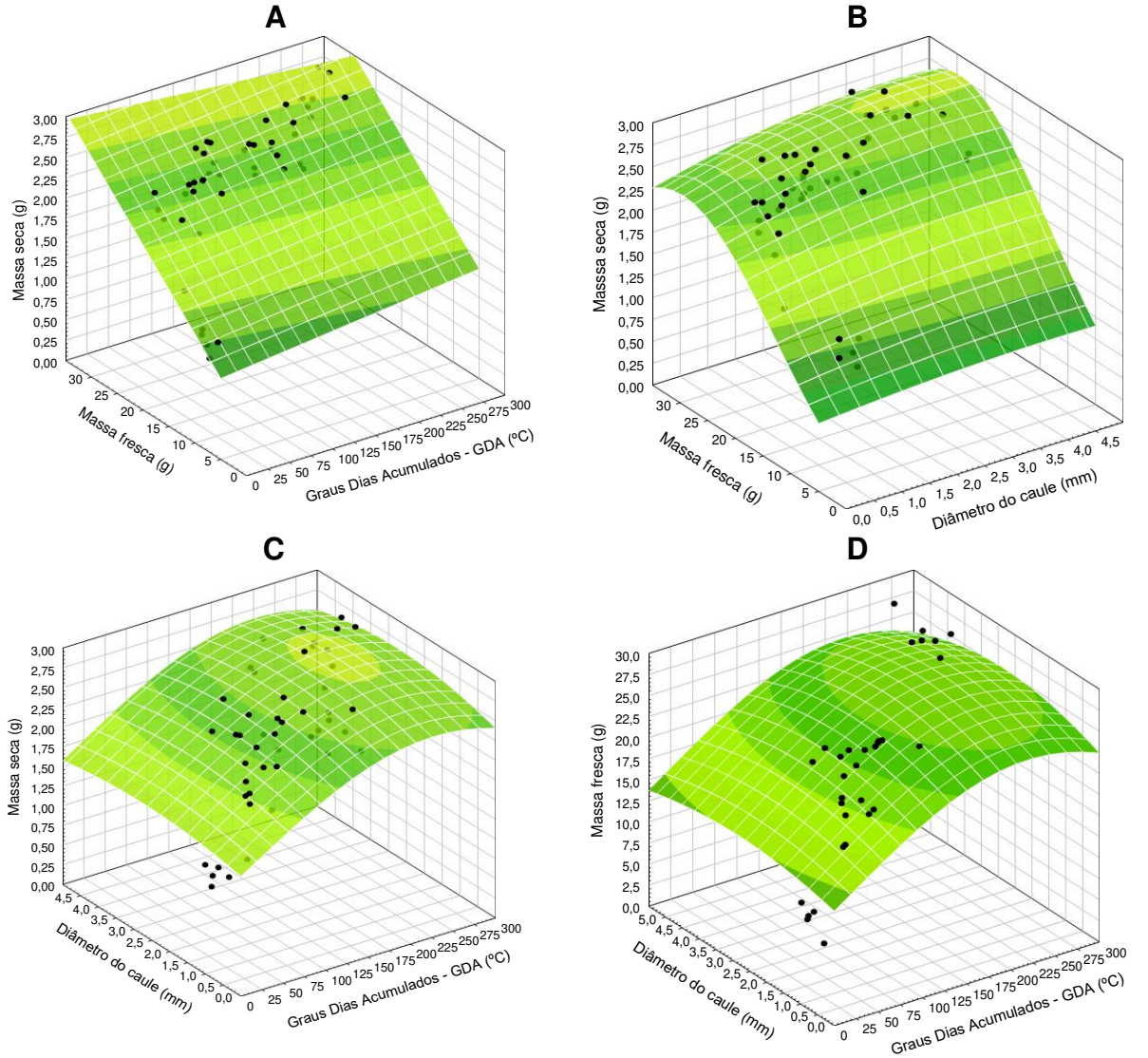
Modelo 3D Gaussiano → $z = a.e^{-0,5\left[\left(\frac{x-x0}{b}\right)^2+\left(\frac{y-y0}{c}\right)^2\right]}$

Em que : z = Massa fresca (g); x = Graus Dias Acumulados (ºC); y = Diâmetro do caule (mm)

x_0	218,891	31,436	<0,0001	
y_0	2,814	0,928	0,0040	
a	27,263	0,931	<0,0001	0,611
b	202,938	33,770	<0,0001	
c	5,852	2,990	0,0565	

Fonte: Arquivo pessoal dos autores

Figura 4 - Ilustração gráfica dos modelos tridimensionais ajustados: **A)** Modelo 3D Plano (R^2 = 0,783) Massa seca em função do GDA e Massa Fresca; **B)** Modelo 3D Gaussiano (R^2 = 0,8) Massa seca em função do Diâmetro do Caule e Massa Fresca; **C)** Modelo 3D Gaussiano (R^2 = 0,601) Massa seca em função do GDA e Diâmetro do Caule; **D)** Modelo 3D Gaussiano (R^2 = 0,611) Massa fresca em função do GDA e Diâmetro do Caule.



Fonte: Arquivo pessoal dos autores

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

Além dos padrões identificados nos modelos 2D e 3D, a análise conjunta dos resultados evidencia que o coentro apresenta uma resposta altamente dependente da interação entre variáveis fisiológicas, térmicas e morfológicas, reforçando o caráter multifatorial do crescimento em sistemas hidropônicos. A convergência entre os pontos de máximo observados nos modelos Gaussianos e os valores assintóticos dos modelos logísticos confirma que o coentro possui uma janela térmica estreita de máximo desempenho, fenômeno também destacado por Reis & Lopes (2016) ao analisarem a produção comercial da cultura. Em condições de acúmulo térmico moderado — entorno de 215 a 230 ºC.dia — ocorre a maior taxa de conversão de energia luminosa e térmica em biomassa, o que sugere alta eficiência fotossintética e estabilidade fisiológica, como discutido por Taiz *et al*. (2017).

Entretanto, quando o acúmulo térmico ultrapassa essa faixa ideal, os modelos 3D indicam declínio na massa fresca e seca, comportamento associado ao estresse térmico e à redução do potencial hídrico foliar, amplamente discutidos por Larcher (2004) e observados experimentalmente em folhosas por Silva *et al*. (2018). Outro aspecto relevante é que a forte correlação entre diâmetro do caule, massa fresca e massa seca evidencia que o coentro, embora seja uma folhosa de arquitetura simples, responde estruturalmente às condições ambientais com significativo investimento em tecido de sustentação, como apontado por Pereira *et al*. (2020). Assim, os modelos matemáticos utilizados não apenas descrevem o comportamento vegetal, mas revelam que o coentro hidropônico apresenta uma fisiologia altamente ajustável às condições ambientais, permitindo prever de maneira precisa o ponto ótimo de colheita — uma ferramenta valiosa para produtores que buscam padronização e regularidade, conforme enfatizado por Costa *et al*. (2019) e Lima *et al*. (2021).

Ademais, Moura e Lima (2025) afirmam que a modelagem matemática facilita a integração entre pesquisa e ensino, devido ao seu caráter investigativo. Assim como Baumer *et al* (2025) ressalta a importância de continuar investindo em estudos que explorem a relação entre modelagem matemática e atividades experimentais. Já Silva, *et al* (2025) afirma que a modelagem matemática favorece uma compreensão mais estruturada do conceito, ao integrar medições, cálculos e interpretação dos resultados.

CONCLUSÕES

O presente estudo atingiu seu objetivo de compreender como o acúmulo térmico, expresso pelos Graus-Dias Acumulados (GDA), influencia o crescimento vegetativo do coentro hidropônico, permitindo caracterizar, modelar e prever o comportamento morfofisiológico da cultura sob condições controladas de produção. Os resultados demonstraram que o GDA atuou como variável integradora altamente sensível às respostas da planta, apresentando correlações consistentes com variáveis estruturais e fisiológicas.

O diâmetro do caule destacou-se como o mais robusto indicador morfológico, apresentando correlação significativa com os GDA ($r = 0,792$) e ajustando-se adequadamente aos modelos linear e exponencial, o que reforça seu papel na sustentação e distribuição de biomassa em sistemas NFT. A dinâmica dos sólidos fixos e voláteis confirmou um processo progressivo de maturação estrutural, com aumento da fração mineral e redução da fração orgânica, evidenciando lignificação ao longo do ciclo.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

O ajuste dos modelos bidimensionais e tridimensionais foi essencial para definir a zona térmica de máximo desempenho fisiológico. Os modelos logísticos apresentaram os melhores ajustes para massa fresca (R^2 = 0,818) e massa seca (R^2 = 0,781), enquanto o modelo tridimensional Gaussiano massa seca × diâmetro × massa fresca exibiu desempenho superior (R^2 = 0,800). Os pontos ótimos identificados entre 218 e 227 ºC.dia mostraram que o coentro possui uma faixa térmica estreita na qual maximiza sua conversão de energia luminosa e térmica em biomassa.

Esses achados confirmam que o coentro hidropônico apresenta elevada sensibilidade térmica e que o uso de GDA é uma ferramenta precisa e operacional para prever o ponto ideal de colheita, ajustar cronogramas de produção e otimizar estratégias de manejo hídrico, nutricional e microclimático. Assim, o estudo contribui significativamente para o aprimoramento da produção hidropônica de folhosas na região do Vale do São Francisco e fortalece a base científica necessária para futuras aplicações em modelagem fenológica e automação do cultivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos proprietários e colaboradores da hidroponia Sal da Terra pela disponibilidade do espaço e insumos necessários para a condução do experimento de campo.

REFERÊNCIAS

BAIYIN, B. *et al.* Effect of nutrient solution flow rate on hydroponic plant growth and root morphology. **Plants**, Basel, v. 10, n. 9, art. 1840, set. 2021.

BATISTA, E. L. da S. *et al*. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 10, p. 1081-1087, jul. 2013.

BAUMER *et al*. Modelagem matemática e atividades experimentais: : contribuições para o ensino de física. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, *[S. l.]*, v. 12, n. 1, p. 1–19, 2025. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/4184. Acesso em: 2 jan. 2026.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronôm**ica, Recife, v. 10, n. 1, p. 14-23, 2013 [2014]. Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/download/152/141/0. Acesso em: 13 out. 2025.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. 4. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004.

CARMO, V. M. S. do. **Modelos sigmoidais e suas aplicações**. 2022. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Araraquara, 2022. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstreams/29cbcac9-8c6b-44eb-8652-aae09854fafc/download. Acesso em: 9 out. 2025.

CHOWDHURY, H. *et al.* Influencing factors for plant growth patterns in hydroponic and aquaponic systems: review and subgroup analysis. **Heliyon**, v. 10, e27993, 2024.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Statistics without maths for psychology**. 4th ed. London: Pearson Education, 2006.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

FREITAS, A. R. de. **Estatística experimental na agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. 457 p. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1149859/1/Estatistica-experimental-na-agropecuaria-ed-01-2022-publicacao-digital.pdf. Acesso em: 29 out. 2025.

FURLANI, P. R. *et al*. Cultivo de alface em sistema hidropônico: composição mineral e desempenho. **Bragantia**, v. 58, n. 2, p. 367-373, 1999.

FURLANI, P. R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de hidroponia NFT**. Campinas: Instituto Agronômico, 1998. (Boletim Técnico, 168).

KONG, Y. *et al*. An iterative leave-one-out approach to outlier detection in RNA-Seq data. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 10, n. 5, e0125224, 2015. Disponível em: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0125224. Acesso em: 29 out. 2025.

LOH, W.; HUBER, P.; TIBSHIRANI, R. Advances in robust statistical methods for biological data. **Annual Review of Statistics and Its Application**, v. 12, p. 55-80, 2025.

LOPES, C. A.; CARRIJO, O. A.; MAKISHIMA, N. **Contaminação com patógenos em sistemas hidropônicos: como aparecem e como evitar**. Brasília, DF: Embrapa, 2005. 4 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/779131/1/cot31.pdf. Acesso em: 23 set. 2025.

MAIA LIMA, L. F. *et al*. A influência de outliers nos estudos métricos da informação: uma análise de dados univariados. **Em Questão**, Porto Alegre, v. 24, p. 216-235, 2018. DOI: 10.19132/1808-5245240.216-235. Disponível em: https://seer.ufrgs.br/index.php/EmQuestao/article/view/86661. Acesso em: 20 out. 2025.

MASABNI, J.; LILLARD, P. **Easy gardening – cilantro**. Texas: Texas A&M Agrilife Communications, 2011. 2 p. Disponível em: https://aggie-horticulture.tamu.edu/vegetable/wp-content/uploads/sites/10/2010/10/E-277_cilantro.pdf. Acesso em: 29 set. 2025.

MATOS, A. T. de. **Manual de análise de resíduos sólidos e águas residuárias**. Viçosa: UFV, 2015. 149 p.

MELO JÚNIOR, J. C. F. de *et al*. Ajuste do modelo expolinear para o crescimento de mudas de mamoeiro cultivadas em Petrolina, PE. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA (CONBEA)**, 44., 2015, Petrolina. Anais [...]. São Pedro: CONBEA, 2015. p. 1-4.

MIOT, H. A. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 16, n. 2, p. 88-91, 2017. DOI: 10.1590/1677-5449.041117. Disponível em: https://www.scielo.br/j/jvb/a/FPW5hwZ6DTH4gvj5mJYpt6B/. Acesso em: 29 out. 2025.

MONTEIRO, J. E. B. A. (org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. 530 p. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/publicacoesDigitais/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

MOURA, E.L.; LIMA, A.M. Modelagem matemática e ajuste de curvas : um método de ensino aplicado à evolução populacional. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, *[S. l.]*, v. 14, n. 1, p. 1–26, 2025. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/4316. Acesso em: 2 jan. 2026.

NUNES, M. U. C. *et al*. **Sistema de produção orgânico de repolho em consórcio com o coentro em Sergipe**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007. 5 p. (Circular Técnica, 49). Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2007/ct-49.pdf. Acesso em: 9 out. 2025.

OLIVEIRA, F. B. Estimativa do poder calorífico e da composição elementar de biomassas a partir da análise imediata. 2010. 98 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)** – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 20/12/2025 - **Accepted:** 02/01/2026
Vol: 01.01
DOI: 10.61164/qtva5290
Pages: 1-23

PARREIRA, L. M. **Bioestatística básica aplicada às ciências da saúde**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2018.

PAULUS, D. *et al*. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 1, p. 110-117, jan./fev. 2012. Disponível em: https://www.redalyc.org/pdf/3052/305226803016.pdf. Acesso em: 9 out. 2025.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. **Guaíba**: Agropecuária, 2020.

SANTOS, C. A.; SILVA, D. L.; MOURA, R. S. Produção e qualidade do coentro em diferentes sistemas de cultivo e densidades populacionais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 265-272, 2018.

SILVA *et al*. Razões que explicam o mundo: modelando a densidade como eixo de integração entre matemática e ciências. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, *[S. l.]*, v. 21, n. 05, p. 1–26, 2025. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/5170. Acesso em: 2 jan. 2026.

SOUZA, J. L.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; SOARES, J. M.; SANTOS, C. A. F. Graus-dia e sua aplicação na agricultura. Petrolina, PE: **Embrapa Semiárido**, 2007. 30 p. (Documentos, 201).

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

VILLA NOVA, N. A. *et al*. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, n. 30, p. 1-8, 1972. Disponível em: https://www.scielo.br/j/aesalq/a/DBByjp6g5dFYL9nCgLS7jTq/. Acesso em: 13 out. 2025.

WILCOX, R. **Introduction to robust estimation and hypothesis testing**. 5. ed. San Diego: Academic Press, 2023.

WU, W. *et al*. The role of light in regulating plant growth, development and sugar metabolism: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, art. 1507628, 2025. Disponível em: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2024.1507628/full. Acesso em: 20 out. 2025.