57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA À PRODUÇÃO DE LIMÃO TAHITI (*Citrus latifolia*) NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION APPLIED TO TAHITI LIME (*Citrus latifolia*) PRODUCTION IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

Stefeson Bezerra de Melo
Professor do Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia da Informação - UFERSA
R. Gamaliel Martins Bezerra, Angicos - RN, 59515-000
stefeson@ufersa.edu.br

Elydmilla Dawily Souza Lima
Estudante do Curso de Engenharia de Produção - Ufersa
R. Gamaliel Martins Bezerra, Angicos - RN, 59515-000
elydmilla@outlook.com

Ari Tibiriçá de Macêdo Neto
Engenheiro Agrônomo da Flores Empreendimentos
Lote 39, distrito irrigado do baixo-açu, Afonso Bezerra - RN
amnetorn@hotmail.com

Ivan Mezzomo
Professor do Departamento de Ciências Exatas e Naturais - UFERSA
Avenida Francisco Mota, 572, bairro Costa e Silva, Mossoró-RN, CEP: 59.625-900
imezzomo@ufersa.edu.br

Matheus da Silva Menezes
Departamento de Informática e Matemática Aplicada – UFRN
Av. Sen.Salgado Filho, 3000, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal - RN, CEP 59078-970.
matheus.menezes@ufrn.br

Glauber Henrique de Souza Nunes
Professor do Departamento de Ciências Agrárias - UFERSA
Avenida Francisco Mota, 572, bairro Costa e Silva, Mossoró-RN, CEP: 59.625-900
glauber@ufersa.edu.br

RESUMO

Este estudo aplica a otimização multiobjetivo à produção de limão Tahiti (*Citrus latifolia*) no semiárido brasileiro, visando maximizar simultaneamente peso e °Brix dos frutos. Os dados foram coletados em três áreas do Distrito Irrigado do Baixo Assú (RN), na zona rural do Alto do Rodrigues, considerando posições apical, mediana e basal na planta. A análise estatística e o uso do algoritmo NSGA-II permitiram identificar soluções Pareto-ótimas que equilibram rendimento e qualidade. Frutos da área A2 apresentaram maior peso, enquanto os da área A3, em posição basal, mostraram melhor equilíbrio entre os objetivos. Modelos preditivos por regressão múltipla alcançaram R^2 de 0,88 para peso e 0,73 para °Brix, com baixos RMSE e altos índices de Willmott, possibilitando estimativas eficazes a partir de variáveis morfológicas. A abordagem proposta contribui para decisões mais precisas no manejo e na comercialização da cultura.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

Palavras-chave: Limão Tahiti, Otimização multiobjetivo, Algoritmo NSGA-II, Qualidade e rendimento de frutos

AG&MA – PO na Agricultura, Meio Ambiente e Sustentabilidade , ADM – Métodos Multicritério para Ajuda de Tomada de Decisão

ABSTRACT

This study applies multi-objective optimization to the production of Tahiti lime (*Citrus latifolia*) in the Brazilian semi-arid region, aiming to simultaneously maximize fruit weight and °Brix. Data were collected from three areas of the Baixo Assú Irrigated District (RN), considering apical, median, and basal fruit positions on the plant. Statistical analysis and the use of the NSGA-II algorithm allowed the identification of Pareto-optimal solutions that balance yield and quality. Fruits from area A2 showed the highest weight, while those from area A3, in the basal position, presented the best balance between objectives. Predictive models using multiple regression achieved R^2 values of 0.88 for weight and 0.73 for °Brix, with low RMSE and high Willmott indices, enabling accurate estimates from simple morphological variables. The proposed approach contributes to more precise decision-making in crop management and commercialization.

KEYWORDS: Tahiti lime, Multi-objective optimization, NSGA-II algorithm, Fruit quality and yield

AG&MA – OR in Agriculture, Environment and Sustainability, MCDM – Multi-Criteria Decision-Making Methods for Decision Support

1. Introdução

O limão Tahiti (*Citrus latifolia*) é uma das frutas cítricas mais relevantes do Brasil, com grande impacto econômico no mercado interno e nas exportações. O cultivo dessa variedade é favorecido por condições climáticas tropicais e subtropicais, sendo amplamente praticado em polos de agricultura irrigada, como o Distrito Irrigado do Baixo Assú, no Rio Grande do Norte [BASSAN et al., 2015].

A produtividade e a qualidade do limão Tahiti são influenciadas por uma série de fatores agronômicos e ambientais. Dentre os parâmetros mais relevantes para a avaliação da qualidade dos frutos, destacam-se o peso, o tamanho, a espessura da casca e o teor de sólidos solúveis totais (°Brix). Este último é um importante indicador da concentração de açúcares e ácidos, refletindo o sabor e o estágio de maturação do fruto. Estratégias como o uso de ácido giberélico, ceras naturais e filmes plásticos têm sido utilizadas com sucesso para manter essas características durante o armazenamento [SOUZA et al., 2015; MOURA et al., 2023].

A busca simultânea por maior peso e melhores características sensoriais apresenta um desafio clássico de otimização multiobjetivo, no qual os objetivos são conflitantes. Métodos baseados em algoritmos evolutivos, como o NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), têm se destacado nesse contexto por sua capacidade de gerar soluções Pareto-ótimas — isto é, um conjunto de alternativas igualmente válidas que representam diferentes equilíbrios entre os objetivos [DEB et al., 2002; CHENG et al., 2025].

O NSGA-II tem sido amplamente adotado em problemas agrícolas e industriais devido à sua eficiência na exploração de grandes espaços de soluções e à preservação da diversidade entre as respostas geradas [REGO et al., 2022; VIANA et al., 2019]. Quando aplicado à fruticultura, esse tipo de algoritmo permite considerar variáveis interdependentes e restrições práticas do campo, oferecendo aos produtores ferramentas para tomar decisões mais precisas e personalizadas de acordo com as condições locais e exigências do mercado.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

Além disso, características morfológicas e fisiológicas, como a posição do fruto na planta, também influenciam os resultados produtivos. Estudos mostram que frutos localizados na parte basal da copa tendem a apresentar maiores valores de peso e °Brix, sugerindo que a distribuição espacial deve ser considerada na modelagem e otimização de práticas de manejo [SILVA et al., 2012).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o algoritmo NSGA-II para a otimização multiobjetivo da produção de limão Tahiti, buscando identificar combinações ideais de parâmetros que maximizem simultaneamente o rendimento (peso) e a qualidade (°Brix), com base em dados empíricos coletados em três áreas distintas do Distrito Irrigado do Baixo Assú.

O limão Tahiti (*Citrus latifolia*) é uma das frutas cítricas mais relevantes do Brasil, com grande impacto econômico no mercado interno e nas exportações. O cultivo dessa variedade é favorecido por condições climáticas tropicais e subtropicais, sendo amplamente praticado em polos de agricultura irrigada, como o Distrito Irrigado do Baixo Assú, no Rio Grande do Norte [BASSAN et al., 2015].

A produtividade e a qualidade do limão Tahiti são influenciadas por uma série de fatores agronômicos e ambientais. Dentre os parâmetros mais relevantes para a avaliação da qualidade dos frutos, destacam-se o peso, o tamanho, a espessura da casca e o teor de sólidos solúveis totais (°Brix). Este último é um importante indicador da concentração de açúcares e ácidos, refletindo o sabor e o estágio de maturação do fruto. Estratégias como o uso de ácido giberélico, ceras naturais e filmes plásticos têm sido utilizadas com sucesso para manter essas características durante o armazenamento [SOUZA et al., 2015; MOURA et al., 2023].

O NSGA-II tem sido amplamente adotado em problemas agrícolas e industriais devido à sua eficiência na exploração de grandes espaços de soluções e à preservação da diversidade entre as respostas geradas [REGO et al., 2022; VIANA et al., 2019]. Quando aplicado à fruticultura, esse tipo de algoritmo permite considerar variáveis interdependentes e restrições práticas do campo, oferecendo aos produtores ferramentas para tomar decisões mais precisas e personalizadas de acordo com as condições locais e exigências do mercado.

Além disso, características morfológicas e fisiológicas, como a posição do fruto na planta, também influenciam os resultados produtivos. Estudos mostram que frutos localizados na parte basal da copa tendem a apresentar maiores valores de peso e °Brix, sugerindo que a distribuição espacial deve ser considerada na modelagem e otimização de práticas de manejo [SILVA et al., 2012].

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o algoritmo NSGA-II para a otimização multiobjetivo da produção de limão Tahiti, buscando identificar combinações ideais de parâmetros que maximizem simultaneamente o rendimento (peso) e a qualidade (°Brix), com base em dados empíricos coletados em três áreas distintas do Distrito Irrigado do Baixo Assú.

2. METODOLOGIA

2.1. Base de Dados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados em três áreas distintas (A1, A2 e A3) do Distrito Irrigado do Baixo Assú da empresa agrícola Flores Empreendimentos Ltda, no estado do Rio Grande do Norte durante os meses outubro, novembro e dezembro de 2024. As coletas consideraram frutos em diferentes posições na planta: basal (até 0,50 m de altura), mediana (entre 0,50 m e 1,50 m) e apical (acima de 1,50 m). Para cada fruto e planta, foram registradas as seguintes variáveis: peso do fruto (g), comprimento (mm), diâmetro (mm), espessura de polpa (mm), espessura de casca (mm), diâmetro do caule (mm) e teor de sólidos solúveis totais (°Brix).

Ao todo, foram coletadas aleatoriamente 90 amostras, sendo 30 de cada área. Permitindo uma análise abrangente das variações e correlações entre os diferentes parâmetros. Estudos anteriores destacam a importância de considerar a posição do fruto na

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

planta, pois fatores como radiação solar e microclima podem influenciar significativamente as características físico-químicas dos frutos [SILVA et al., 2018].

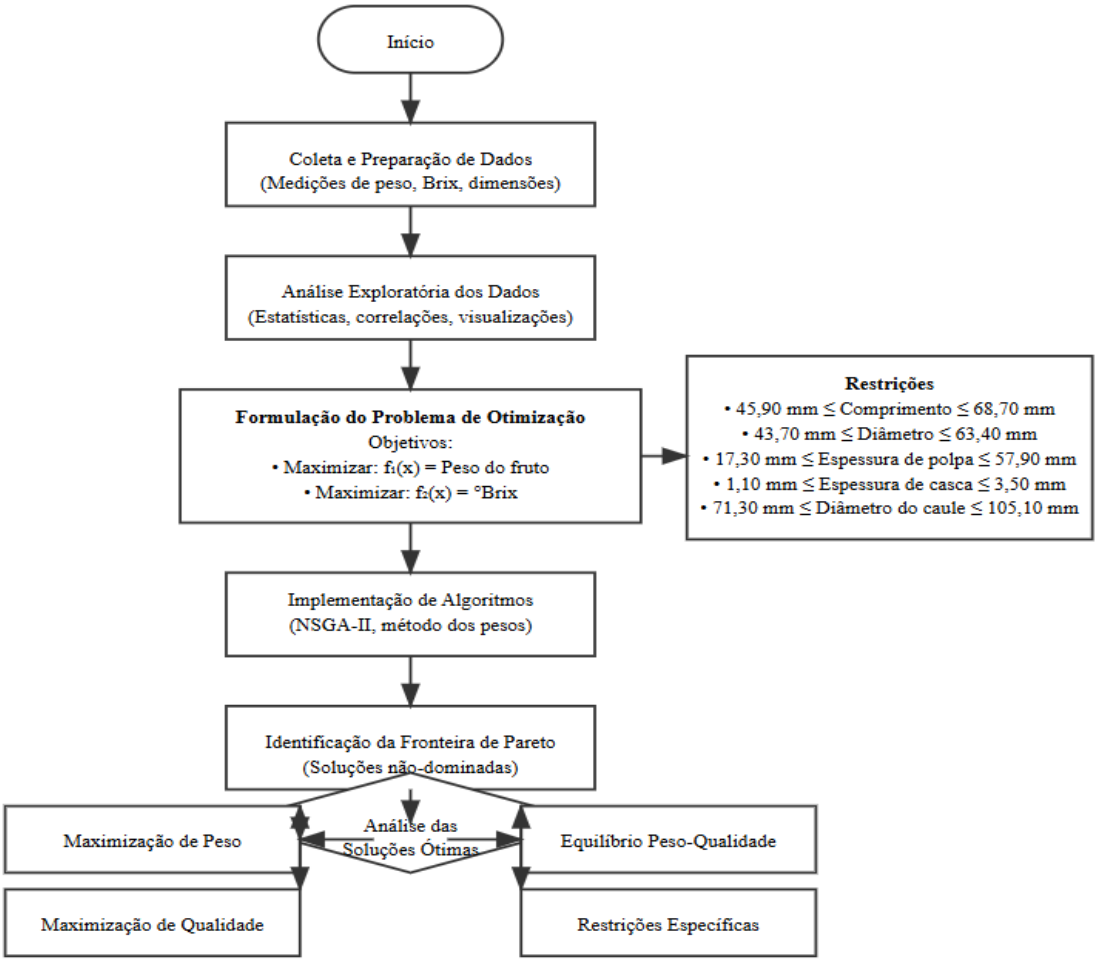
2.2. Análise Estatística Preliminar

Realizou-se uma análise estatística descritiva dos dados, incluindo médias e desvios padrão para cada variável avaliada. Além disso, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson para verificar as relações entre as diferentes variáveis. Essa análise estatística é essencial para identificar padrões e relações entre as variáveis [GOES et al., 2012].

2.3. Problema de Otimização Multiobjetivo

O problema de otimização multiobjetivo foi formulado visando maximizar simultaneamente dois objetivos principais [HU et al. 2024]: maximizar o peso do fruto (g) – indicador de rendimento, e maximizar o teor de sólidos solúveis (°Brix) – indicador de qualidade. Matematicamente o problema pode ser expresso como: maximizar $f_1(x)$ = Peso do fruto e maximizar $f_2(x)$ = °Brix, sujeito às seguintes restrições: 45,90 mm ≤ Comprimento ≤ 68,70 mm, 43,70 mm ≤ Diâmetro ≤ 63,40 mm, 17,30 mm ≤ Espessura de polpa ≤ 57,90 mm, 1,10 mm ≤ Espessura de casca ≤ 3,50 mm, 71,30 mm ≤ Diâmetro do caule ≤ 105,10 mm.

Abaixo segue a metodologia como funciona a metodologia graficamente:



DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

Figura 1: Metodologia de Otimização Multiobjetivo para Maximização Simultânea de Rendimento e Qualidade em Frutos

2.4. Algoritmo NSGA-II

Para resolver o problema de otimização multiobjetivo, foi utilizado o algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), implementado em Python, utilizando a biblioteca Pymoo. Os principais parâmetros do algoritmo foram configurados como: tamanho da população: 100 indivíduos, número máximo de gerações: 200, probabilidade de cruzamento: 0,9, probabilidade de mutação: 0,1, método de seleção: Torneio binário.

O algoritmo foi executado 30 vezes para garantir resultados estatisticamente significativos, e a fronteira de Pareto final foi obtida a partir do conjunto de soluções não-dominadas encontradas em todas as execuções. O NSGA-II é amplamente reconhecido por sua eficácia na resolução de problemas de otimização multiobjetivo em diversas áreas, incluindo a agricultura [CHENG et al., 2025].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise Estatística Descritiva

A análise estatística descritiva dos dados é apresentada na Tabela 1, incluindo médias e desvios padrão para cada parâmetro avaliado, considerando as diferentes áreas (A1, A2 e A3) e posições do fruto (apical, mediana e basal).

Tabela 1. Estatística descritiva com médias e desvios padrão das variáveis peso, comprimento do fruto, diâmetro do fruto avaliados por área e posição do fruto na copa da planta

Área	Posição	Peso (g)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
A1	Apical	80.65 ± 11.80	54.41 ± 1.99	51.39 ± 2.88
A1	Mediana	73.28 ± 10.83	53.26 ± 4.32	50.15 ± 2.41
A1	Basal	82.78 ± 16.65	55.28 ± 3.22	51.95 ± 4.24
A2	Apical	100.07 ± 26.72	52.80 ± 4.44	52.70 ± 4.91
A2	Mediana	104.89 ± 26.39	57.40 ± 6.32	54.78 ± 5.58
A2	Basal	104.18 ± 26.17	58.23 ± 3.96	53.87 ± 3.02
A3	Apical	89.93 ± 28.57	53.73 ± 6.43	51.29 ± 6.49
A3	Mediana	84.19 ± 26.79	52.49 ± 8.13	49.78 ± 6.01
A3	Basal	109.37 ± 44.08	58.63 ± 7.00	57.11 ± 6.70

Tabela 1. (continuação) Estatística descritiva com médias e desvios padrão das variáveis espessura de polpa, espessura da casca, diâmetro do caule e o ºBrix avaliados por área e posição do fruto na copa da planta

Área	Posição	Esp. de Polpa (mm)	Esp. de Casca (mm)	Diâm. do Caule (mm)	ºBrix
A1	Apical	48.35 ± 3.62	2.01 ± 0.37	98.47 ± 5.40	9.59 ± 0.90
A1	Mediana	45.99 ± 2.38	2.16 ± 0.58	98.47 ± 5.40	9.77 ± 0.78

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

A1	Basal	47.86 ± 3.39	2.26 ± 0.50	98.47 ± 5.40	9.72 ± 0.57
A2	Apical	47.82 ± 3.38	2.21 ± 0.44	86.71 ± 9.15	9.67 ± 0.58
A2	Mediana	46.18 ± 10.82	2.51 ± 0.37	86.71 ± 9.15	9.33 ± 0.57
A2	Basal	48.19 ± 3.43	2.60 ± 0.47	86.71 ± 9.15	9.81 ± 0.51
A3	Apical	42.67 ± 9.84	2.28 ± 0.95	93.87 ± 8.79	9.50 ± 0.19
A3	Mediana	44.77 ± 9.02	1.81 ± 0.90	91.12 ± 8.87	9.38 ± 0.54
A3	Basal	48.45 ± 9.50	2.81 ± 0.94	95.67 ± 6.48	9.48 ± 0.65

A estatística descritiva dos dados é apresentada na Tabela 1, incluindo médias e desvios padrão para cada parâmetro avaliado, considerando as diferentes áreas (A1, A2 e A3) e posições do fruto (apical, mediana e basal). Os dados indicam que a posição do fruto na planta e a área de cultivo influenciam significativamente as características físicas dos frutos de limão Tahiti. Frutos da área A3 e da posição basal apresentaram os maiores valores médios para peso (109,37 g), comprimento (58,63 mm) e diâmetro (57,11 mm), evidenciando o impacto de microambientes mais favoráveis ao desenvolvimento dos frutos nas partes inferiores da copa, como já discutido em estudos anteriores com outras culturas frutíferas [BASSAN et al., 2015).

Na continuidade da análise, verificam-se diferenças nos parâmetros químicos, como o teor de sólidos solúveis (°Brix), que variou entre 9,33 e 9,81, com os maiores valores novamente associados à posição basal, principalmente na área A2. Essa tendência pode estar relacionada à maior eficiência de acúmulo de fotoassimilados nessas posições, além de menor exposição ao estresse térmico e hídrico [MOURA et al., 2023]. A espessura da polpa e da casca também apresentou variações importantes: frutos da área A3-Basal registraram os maiores valores médios de espessura de casca (2,81 mm) e de polpa (48,45 mm), o que pode contribuir para a resistência física e conservação pós-colheita, aspectos relevantes para a cadeia de comercialização [SOUZA et al., 2015].

3.2. Correlação entre as variáveis

As correlações entre as variáveis foram calculadas para identificar relações importantes que poderiam influenciar o modelo de otimização. A matriz de correlação é apresentada na Tabela 2.

A análise da matriz de correlação de Pearson (Tabela 2) evidenciou relações significativas entre variáveis morfológicas e os atributos físico-químicos dos frutos de limão Tahiti. O peso apresentou correlação positiva com o diâmetro (r = 0,24*) e com o comprimento do fruto (r = 0,22*), indicando que frutos maiores tendem a acumular mais massa. Por outro lado, o °Brix não apresentou correlações expressivas com as variáveis avaliadas, sugerindo que sua variação está menos associada a aspectos morfológicos e mais ligada a fatores fisiológicos ou de manejo.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

Tabela 2. Matriz de correlação de Pearson das variáveis peso, comprimento do fruto, diâmetro, espessura de polpa, espessura da casca, diâmetro do caule e o ºBrix avaliados por área e posição do fruto na copa da planta

Variáveis	Peso	Comp. do Fruto	Diâm. do fruto	Esp. de Polpa	Esp. de Casca	Diâm do Caule	ºBrix
Peso	1						
Comp. do Fruto	0.22*	1					
Diâm. do fruto	0.24*	0.69*	1				
Esp. de Polpa	0.09	0.28*	0.34*	1			
Esp. de Casca	0.11	0.33*	0.34*	-0.25*	1		
Diâm do Caule	0.08	-0.12	-0.12	-0.11	-0.02	1	
ºBrix	-0.12	0.01	-0.08	-0.12	0.07	0.05	1

A fraca correlação negativa entre °Brix e espessura de polpa (r = –0,12) pode indicar diluição de açúcares em frutos com maior proporção de polpa. Tais resultados corroboram estudos como o de Goes et al. [2012], que também observaram baixa associação entre atributos físicos e o teor de sólidos solúveis em limões, destacando a complexidade na predição da qualidade interna com base apenas em medidas externas.

3.3. Efeito da Área e Posição do Fruto

3.3.1 Análise do Peso dos Frutos

A análise do efeito da área de cultivo e da posição do fruto sobre o peso do fruto e o ºBrix revelou tendências importantes, como ilustrado na figura 2.

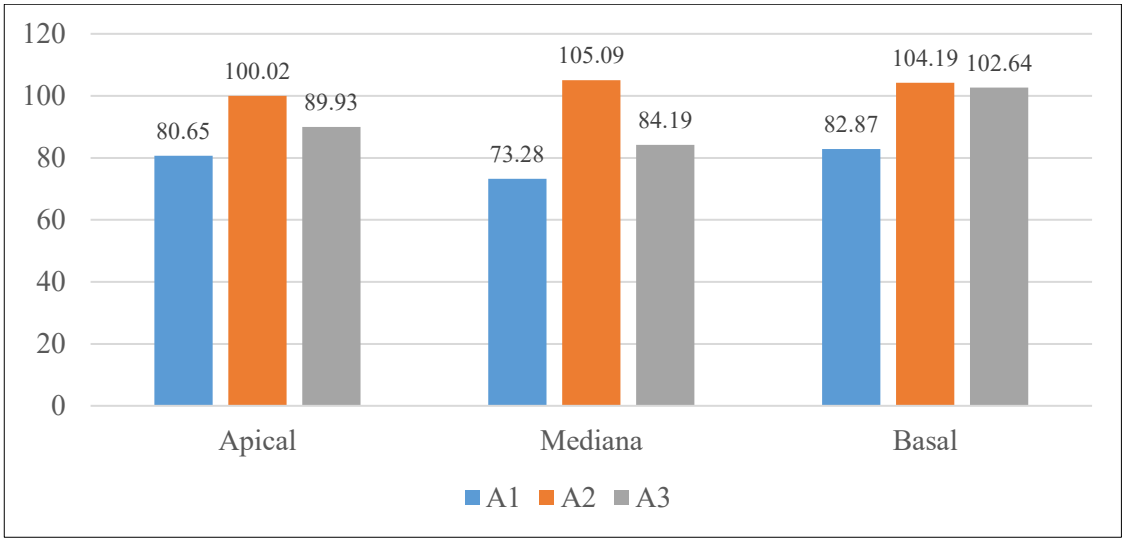


Figura 2 – Peso médio dos frutos de limão Tahiti em função da área de cultivo (A1, A2, A3) e da posição na planta (apical, mediana e basal), no Distrito Irrigado do Baixo Assú (RN).

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

Observou-se que os frutos da área A2 apresentaram o maior peso médio (103,10 g), seguidos pela área A3 (92,25 g) e A1 (78,93 g). A diferença entre A2 e A1 foi de 24,17 g, representando um aumento de aproximadamente 30,6%. Estudos indicam que fatores como tipo de porta-enxerto e salinidade da água de irrigação podem influenciar significativamente o peso dos frutos cítricos [SANTOS et al., 2021].

Em relação à posição do fruto na planta, os frutos basais apresentaram maior peso médio (96,57 g) em comparação com os apicais (90,20 g) e medianos (87,52 g). A diferença entre frutos basais e medianos foi de 9,05 g, representando aproximadamente 10,3% de variação. A posição do fruto pode afetar a exposição à luz solar e a assimilação de nutrientes, influenciando o desenvolvimento do fruto [MELO, 2017].

A interação entre área e posição revelou comportamentos distintos. Na área A1, os frutos medianos apresentaram o menor peso (73,28 g), enquanto os basais tiveram o maior peso (82,87 g). Na área A2, os frutos medianos apresentaram o maior peso (105,09 g), ligeiramente superior aos basais (104,19 g). Na área A3, observou-se um gradiente crescente de peso da posição apical para a basal (89,93 g → 84,19 g → 102,64 g), com aumento nos frutos basais.

3.3.2 Análise do Teor de Sólidos Solúveis (°Brix)

Quanto ao teor de sólidos solúveis (°Brix), conforme a figura 3, a área A1 apresentou o maior valor médio (9.69 °Brix), seguida pela área A2 (9.60 °Brix) e A3 (9.45 °Brix). A diferença entre as médias de °Brix das áreas foi pequena (apenas 0.24 °Brix entre A1 e A3), sugerindo que a área de cultivo tem influência menos pronunciada sobre esta variável. A qualidade físico-química dos frutos pode ser influenciada por fatores como porta-enxerto e condições edafoclimáticas [ALMEIDA e SOUZA, 2019].

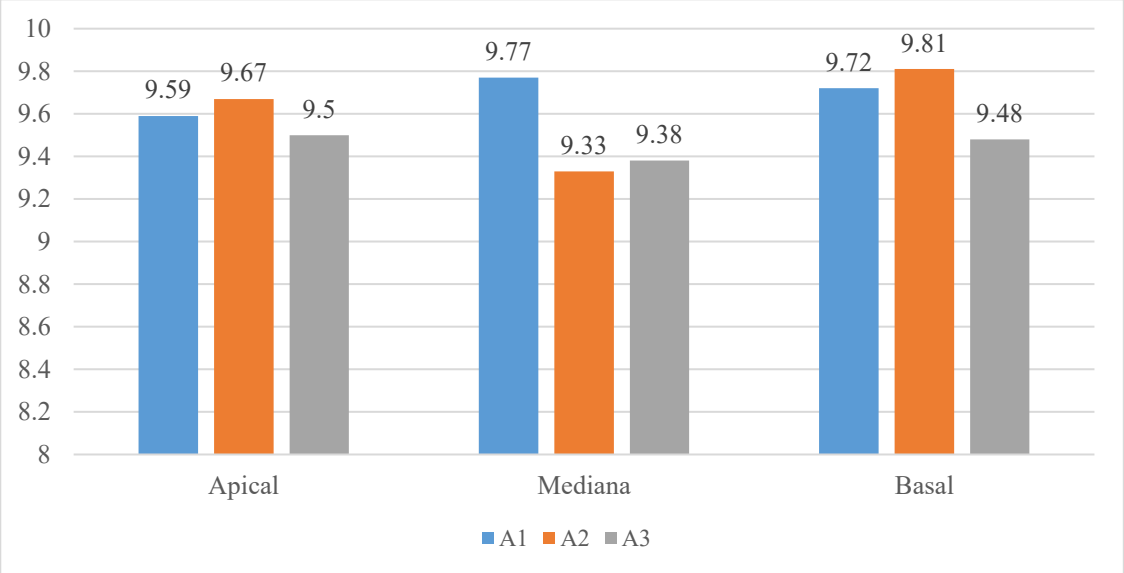


Figura 3 – Teor médio de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos de limão Tahiti em função da área de cultivo (A1, A2, A3) e da posição na planta (apical, mediana e basal), no Distrito Irrigado do Baixo Assú (RN).

Em relação à posição do fruto, os frutos basais apresentaram o maior teor médio de sólidos solúveis (9.67 °Brix), corroborando com o padrão observado para o peso. Os frutos apicais e medianos apresentaram valores de °Brix médio (9.59 °Brix) e (9.49 ºBrix)

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

respectivamente. A variação de °Brix entre posições foi muito pequena (0.24 °Brix), indicando que a posição do fruto tem efeito limitado sobre esta característica.

A interação entre área e posição mostrou que o maior valor individual de °Brix foi observado nos frutos basais da área A2 (9.81 °Brix), enquanto o menor valor foi registrado nos frutos medianos da área A2 (9.33 °Brix).

3.4. Otimização Multiobjetivo

A execução do algoritmo NSGA-II resultou em um conjunto de soluções não-dominadas, representando a fronteira de Pareto do problema de otimização. A Figura 4 ilustra esta fronteira, evidenciando o trade-off entre os objetivos de maximização do peso e do teor de sólidos solúveis e as soluções Pareto-ótimas foram agrupadas em três categorias, conforme apresentado na Tabela 3, para facilitar a tomada de decisão pelos produtores, de acordo com suas preferências de mercado.

A análise das soluções Pareto-ótimas revelou que frutos da área A3 em posição basal apresentaram as melhores combinações para o equilíbrio entre rendimento e qualidade, enquanto frutos da área A2 em posição basal foram mais adequados para a categoria de maior rendimento, e frutos da área A3 em posição apical destacaram-se na categoria de maior qualidade.

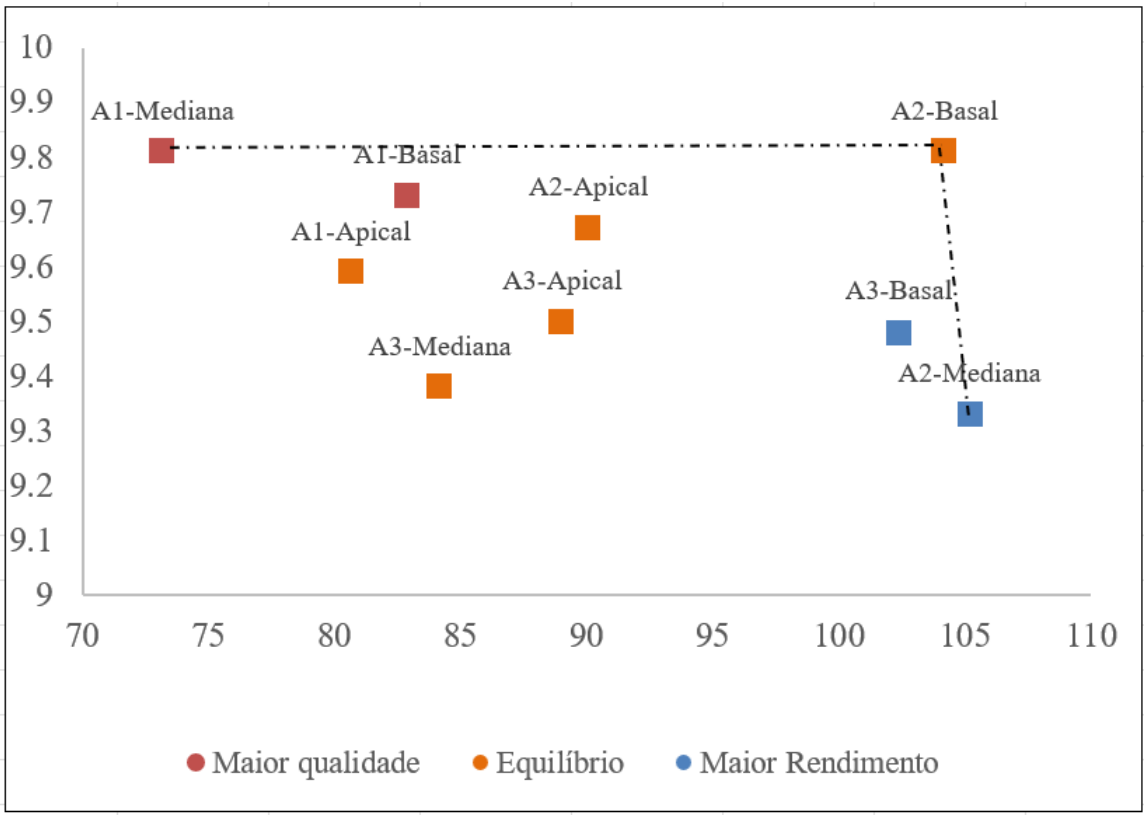


Figura 4 – Fronteira de Pareto obtida pelo algoritmo NSGA-II para a otimização simultânea do peso e do teor de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos de limão Tahiti.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

Tabela 3: Categorias de soluções Pareto-ótimas para produção de limão Tahiti.

Categoria	Peso (g)	°Brix	Características
Maior rendimento	140-173	8.5-9.5	Frutos grandes e pesados, adequados para mercados que valorizam tamanho
Maior qualidade	80-110	10.5-11.8	Frutos com alto teor de sólidos solúveis, ideais para processamento industrial
Equilíbrio	115-135	9.8-10.4	Compromisso entre rendimento e qualidade, versáteis para diferentes mercados

3.5. Modelagem Preditiva

Com base nos dados obtidos durante a otimização multiobjetivo, foi desenvolvido um modelo preditivo utilizando regressão linear múltipla, com o objetivo de estimar o peso (g) e o teor de sólidos solúveis (°Brix) dos frutos de limão Tahiti a partir de variáveis morfológicas. O modelo foi ajustado considerando as seguintes variáveis independentes: comprimento do fruto (mm), diâmetro do fruto (mm), espessura da polpa (mm), espessura da casca (mm) e diâmetro do caule (mm).
As equações ajustadas foram:

Peso (g) = –95,42 + 1,23 × Comprimento + 1,89 × Diâmetro + 0,38 × Esp. Polpa + 7,45 × Esp. Casca + 0,12 × Diâm. Caule ($R^2 = 0,88$)

°Brix = 7,86 + 0,005 × Comprimento + 0,02 × Diâmetro – 0,01 × Esp. Polpa + 0,15 × Esp. Casca + 0,02 × Diâm. Caule ($R^2 = 0,73$)

O coeficiente de determinação (R^2) indica que 88% da variação no peso e 73% da variação no °Brix são explicadas pelos modelos, o que demonstra um bom ajuste às observações. Além disso, os modelos foram avaliados por métricas adicionais de desempenho, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Estatísticas de validação dos modelos preditivos

Variável	RMSE	MAE	Índice de Willmott (d)
Peso (g)	8,47	6,85	0,96
°Brix	0,31	0,26	0,91

O erro quadrático médio (RMSE) e o erro absoluto médio (MAE) permaneceram baixos para ambos os modelos, reforçando sua acurácia. O índice de Willmott (d), apresentou valores próximos de 1, indicando elevada capacidade preditiva dos modelos ajustados.

Desta forma, essas equações permitem estimar, com boa precisão, o peso e ºBrix a partir de simples medições morfológicas em campo, otimizando a avaliação e a seleção de

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br

frutos com características desejáveis. Tal abordagem é especialmente útil para programas de manejo, colheita seletiva e classificação prévia ao beneficiamento e comercialização.

4. Conclusões

Os resultados deste estudo demonstraram que a aplicação do algoritmo NSGA-II à produção de limão Tahiti no semiárido brasileiro permitiu otimizar simultaneamente características de rendimento e qualidade dos frutos, representadas pelo peso e teor de sólidos solúveis (°Brix). A coleta de dados em diferentes áreas e posições na planta possibilitou a identificação de padrões morfológicos relevantes que influenciam diretamente essas variáveis.

As soluções Pareto-ótimas obtidas indicam diferentes estratégias de manejo que podem ser adotadas pelos produtores, a depender das exigências do mercado. Frutos da área A2 demonstraram maior rendimento, enquanto os da área A3, especialmente na posição basal, representaram um equilíbrio entre peso e °Brix. A modelagem preditiva com base em variáveis morfológicas resultou em equações com alto poder explicativo (R^2 = 0,88 para peso e R^2 = 0,73 para °Brix), baixo erro e elevado índice de Willmott, demonstrando sua aplicabilidade prática para avaliação em campo, dessa forma, o uso combinado de técnicas estatísticas e computacionais se mostrou eficiente.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Sabiá pelo recurso financeiro para realização deste trabalho por meio do edital FGD 028/2023, ao Ministério da Integração Regional e a Universidade Federal Rural do Semi-árido – UFERSA.

6. Referências bibliográficas

Bassan, M. M. et al. (2015). Beneficiamento pós-colheita de lima ácida 'Tahiti' afeta sua qualidade e conservação. *Ciência Rural*, v. 45, n. 10, p. 1785–1791, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20141492.

Brito, K. D. et al. (2017). Estudo experimental do limão Tahiti (Citrus latifolia Tanaka): composição físico-química e de minerais da polpa in natura e do resíduo albedo. *Revista Principia*, n. 37, p. 64–70. Disponível em: https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1298.

Cheng, K. et al. (2025) Application of Improved NSGA-II Multi-Objective Genetic Algorithm in Optimal Allocation of Water Resources in Main Tarim River Basin. *Sustainability*, v. 17, n. 4, p. 1526. DOI: https://doi.org/10.3390/su17041526.

Cheng, K. et al. (2025). Application of Improved NSGA-II Multi-Objective Genetic Algorithm in Optimal Allocation of Water Resources in Main Tarim River Basin. *Sustainability*, v. 17, n. 4, p. 1526. DOI: https://doi.org/10.3390/su17041526.

Deb, K. et al. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002. DOI: https://doi.org/10.1109/4235.996017.

Goes, Talita De Souza; CARMO, Jéssica Silva do; BRAGA, Thayane Rabelo; OLIVEIRA, Milena Maria Tomaz de; SILVA, Leirson Rodrigues da; TORRES, Lucicléia Barros de

Vasconcelos (2012). Caracterização física e físico-química de frutos do limão "Tahiti" (Citrus latifolia T.) cultivados em Guaraciaba do Norte-CE. *Cultivando o Saber*, v. 5, n. 3. Disponível em: https://cultivandosaber.fag.edu.br/index.php/cultivando/article/view/443.

Hu, Fengyu et al. (2024) Application of improved NSGA-II model in multi-objective optimization model for sustainable building construction projects. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, v. 24, n. 3. DOI: https://doi.org/10.3233/JCM-247275.

Moura, M. R. L. et al. (2023). Avaliação da vida útil do limão durante o tempo de estocagem com revestimento de goma guar contendo nanoestrutura de quitosana inoculando os fungos *Phomopsis citri* e *Penicillium*. *AgronFood Academy*, 2023. Disponível em: https://agronfoodacademy.com/avaliacao-da-vida-util-do-limao-durante-o-tempo-de-estocagem-com-revestimento-de-goma-guar-contendo-nanoestrutura-de-quitosana-inoculando-os-fungos-phomopsis-citri-e-penicillium/.

Moura, M. R. L. et al. (2023). Avaliação da vida útil do limão durante o tempo de estocagem com revestimento de goma guar contendo nanoestrutura de quitosana inoculando os fungos *Phomopsis citri* e *Penicillium*. *AgronFood Academy*. Disponível em: https://agronfoodacademy.com/avaliacao-da-vida-util-do-limao-durante-o-tempo-de-estocagem-com-revestimento-de-goma-guar-contendo-nanoestrutura-de-quitosana-inoculando-os-fungos-phomopsis-citri-e-penicillium/.

Rego, M. F. et al. (2022). A mathematical formulation and an NSGA-II algorithm for minimizing the makespan and energy cost under time-of-use electricity price in an unrelated parallel machine scheduling. *PeerJ Computer Science*, v. 8, e844, 2022. DOI: 10.7717/peerj-cs.844. Disponível em: https://peerj.com/articles/cs-844/.

Silva, D. F. P. et al. (2012). Diversidade genética entre cultivares de mangueiras, baseada em caracteres de qualidade dos frutos. *Revista Ceres*, v. 59, n. 2, p. 225–232, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200011.

Silva, D. F. P. et al. (2012). Diversidade genética entre cultivares de mangueiras, baseada em caracteres de qualidade dos frutos. *Revista Ceres*, v. 59, n. 2, p. 225–232. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200011.

Souza, J. M. A. et al. (2015). Conservação pós-colheita de lima ácida 'Tahiti' com uso de ácido giberélico, cera de carnaúba e filme plástico em condição refrigerada. *Magistra*, v. 27, n. 1, p. 122–129. Disponível em: https://periodicos.ufrb.edu.br/index.php/magistra/article/view/3900.

Viana, Ê. R. et al. (2019). Otimização multiobjetivo utilizando o NSGA-II adotando uma nova abordagem para reconfiguração na distribuição de sistemas de potência. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*. Disponível em: https://proceedings.science/sbai-2019/trabalhos/otimizacao-multiobjetivo-utilizando-o-nsga-ii-adotando-uma-nova-abordagem-para-r.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212570
https://proceedings.science/p/212570?lang=pt-br