

## **Protótipo de secador solar de baixo custo: desenvolvimento, avaliação e aplicação na desidratação de banana 'Prata'**

### **Development and evaluation of a low-cost solar dryer prototype for the dehydration of 'Prata' banana**

<sup>1</sup>Iago da Silva Almeida, <sup>2</sup>Bruno Emanuel Souza Coelho, <sup>3</sup>Aline Sampaio Santa Rosa, <sup>4</sup>Acácio Figueiredo Neto, <sup>5</sup>Ana Júlia de Brito Araújo Carvalho, <sup>6</sup>Ana Carolina Dias Braga

<sup>1</sup>Técnico em Fruticultura – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural da Bahia, Polo Senhor do Bonfim/BA (iagofrut@gmail.com)

<sup>2</sup>Mestre em Agronomia – Produção Vegetal – Universidade Federal do Vale do São Francisco, *campus* Ciências Agrárias (souza.coelho.18@gmail.com)

<sup>3</sup>Técnico em Zootecnia – Serviço Nacional de Aprendizagem Rural da Bahia, Polo Senhor do Bonfim/BA (Alinesampaio880@gmail.com)

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia Agrícola – Universidade Federal do Vale do São Francisco, *campus* Juazeiro, Colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental (acacio.figueiredo@univasf.edu.br)

<sup>5</sup>Doutora em Engenharia Agrícola – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, *campus* Petrolina, Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Alimentos. (ana.julia@ifsertao-pe.edu.br)

<sup>6</sup>Mestre em Agronomia – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, *campus* Petrolina Zona Rural, Coordenação do Curso Técnico em Agroindústria. (ana.braga@ifsertao-pe.edu.br)

---

**RESUMO:** Este estudo desenvolveu e avaliou um protótipo de secador solar de baixo custo para desidratação da banana 'Prata', como alternativa sustentável para pequenos produtores em regiões semiáridas. O equipamento foi construído com materiais simples e acessíveis, permitindo facilmente replicação. Durante a secagem, o secador elevou a temperatura interna em até 5,69 °C em relação ao ambiente. As bananas *in natura* (71,90% de umidade) tiveram sua umidade reduzida para 15,28% no secador solar após 600 minutos e para 12,64% na estufa após 1380 minutos. A atividade de água caiu de 0,76 para 0,56 nos dois métodos, favorecendo a conservação. A análise de cor ( $L^*$ ) indicou escurecimento mais acentuado na estufa ( $L^* = 50,66$ ) do que no secador solar ( $L^* = 57,55$ ), sugerindo menor degradação de pigmentos neste último. O modelo de Midilli foi o que melhor descreveu a cinética de secagem. Os resultados indicam que o secador solar é uma opção eficiente, sustentável e de baixo custo, com potencial para reduzir perdas pós-colheita e agregar valor à produção. Melhorias no isolamento podem ampliar sua eficácia.

**Palavras Chave:** Agricultura sustentável. Cinética de secagem. Conservação pós-colheita. Energia renovável. Modelagem matemática.

**ABSTRACT:** This study developed and evaluated a low-cost solar dryer prototype for the dehydration of 'Prata' banana as a sustainable alternative for small producers in semi-arid regions. The equipment was built with simple and accessible materials, allowing easy replication. During drying, the dryer raised the internal temperature by up to 5.69°C compared to the ambient temperature. The fresh bananas (71.90% moisture) had their moisture reduced to 15.28% in the solar dryer after 600 minutes and to 12.64% in the greenhouse after 1380 minutes. The water activity decreased from 0.76 to 0.56 in both methods, favoring preservation. The color analysis ( $L^*$ ) indicated more pronounced darkening in the greenhouse ( $L^* = 50.66$ ) than in the solar dryer ( $L^* = 57.55$ ), suggesting less pigment degradation in the latter. The Midilli model best described the drying kinetics. The results indicate that the solar dryer is an efficient, sustainable, and low-cost option with potential to reduce post-harvest losses and add value to production. Improvements in insulation could enhance its effectiveness.

**Keywords:** Sustainable agriculture. Drying kinetics. Post-harvest conservation. Renewable energy. Mathematical modeling.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A desidratação de alimentos é uma das técnicas mais antigas e amplamente empregadas para a conservação de frutas, reduzindo o teor de água e, assim, inibindo o crescimento de microrganismos e retardando a deterioração (MUJUMDAR, 2014). Entre os métodos disponíveis, a secagem solar de exposição direta destaca-se pela simplicidade e baixo custo, especialmente em regiões de recursos limitados. Esse método utiliza a radiação solar direta para aquecer os alimentos, sendo particularmente eficiente em áreas de alta incidência de radiação, como o semiárido brasileiro (ACAR, DINCER; MUJUMDAR, 2022; MOHAMMED, FATUMAH; SHADIA, 2020).

Frutas tropicais, como a banana (*Musa* spp.), enfrentam desafios significativos relacionados à sua perecibilidade. Após a colheita, a alta taxa de respiração e a produção de etileno aceleram o amadurecimento e a deterioração, resultando em um curto prazo de validade. Estima-se que até 30% das bananas produzidas globalmente sejam desperdiçadas devido a problemas de armazenagem e transporte inadequados (ABRAHÃO *et al.*, 2024; CANTON, 2021). Nesse cenário, a desidratação surge como uma solução prática, permitindo prolongar a vida útil do fruto, facilitar o armazenamento e o transporte, além de agregar valor comercial na forma de banana passa (UEBERSAX; SIDDIQ, 2020).

Apesar das vantagens, os métodos de secagem direta apresentam desafios. Embora sejam fáceis de construir e manter, utilizando materiais acessíveis, os alimentos expostos diretamente à radiação solar podem sofrer contaminação por poeira e insetos, além de variações na qualidade devido às oscilações diárias de radiação e temperatura (CHIBUZO *et al.*, 2021; GILAGO; CHANDRAMOHAN, 2024; RAZAK *et al.*, 2021; SONTAKKE; SALVE, 2015). Já os métodos tradicionais, baseados em combustíveis sólidos como lenha e carvão, são amplamente utilizados, mas apresentam desvantagens como alto impacto ambiental e riscos de contaminação do produto. Alternativamente, fontes elétricas são práticas, mas acarretam elevados custos operacionais devido ao alto consumo de energia (LINGAYAT *et al.*, 2022; MOHANA *et al.*, 2020).

Diante dessas limitações, equipamentos que empregam a radiação solar de maneira eficiente e com baixo custo de fabricação têm ganhado destaque. Esses equipamentos são especialmente relevantes para pequenos produtores rurais, que enfrentam restrições financeiras e operam em contextos familiares (COELHO *et al.*, 2020). O Brasil, com suas condições meteorológicas favoráveis, especialmente no Nordeste e em regiões semiáridas, apresenta grande potencial para o uso da energia solar na secagem de alimentos. Essa alternativa utiliza um recurso limpo, gratuito e abundante, sendo economicamente viável e dispensando mão de obra especializada (COELHO *et al.*, 2020).

A análise do processo de secagem é essencial para a obtenção de produtos de qualidade, uma vez que permite estudar a transferência de massa entre o produto e o agente secador. Por meio da cinética de secagem, torna-se possível compreender os mecanismos predominantes do processo (NDUKWU *et al.*, 2023). Nesse contexto, a modelagem matemática desempenha um papel crucial ao representar e prever condições ideais de secagem, contribuindo para o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes e para a obtenção de produtos de alta qualidade (ADNOUNI *et al.*, 2023; PANDEY; KUMAR; SHARMA, 2024).

No semiárido baiano, as altas temperaturas e a intensa radiação solar durante a maior parte do ano tornam o uso de secadores solares uma solução viável e promissora (COELHO *et al.*, 2019; SOARES *et al.*, 2021). Este estudo foca no desenvolvimento de um protótipo de secador solar de exposição direta, utilizando materiais alternativos e de baixo custo. A análise da eficiência térmica e da cinética de secagem é essencial para garantir que a banana desidratada apresente qualidade físico-química adequada, menor risco de deterioração no

armazenamento e maior viabilidade para comercialização em comunidades rurais (COELHO *et al.*, 2020; COELHO *et al.*, 2019).

Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar um protótipo de secador solar de baixo custo para a desidratação da banana 'Prata', analisando sua eficiência térmica, a cinética de secagem e as características físico-químicas do produto final. Os resultados foram comparados aos obtidos por meio da secagem artificial em estufa, e modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais para compreender e aprimorar o desempenho do equipamento.

## 2. MATERIAL E MÉTODO

O experimento foi executado no Centro de Capacitação Regional, do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural da Bahia, localizado no município de Senhor do Bonfim/BA a 10° 27' 57" Latitude Sul, e 40° 10' 51" Logitude Oeste, a uma altitude de 519 metros. O clima do município segundo a classificação de Köppen (1901) é do tipo BSh, tropical semiárido, quente, com estação seca de sete a oito meses. A temperatura máxima é de 27 °C, e a mínima de 18 °C, com a média anual é de 23,1 °C. A precipitação pluviométrica média anual é 768 mm por ano. Os materiais utilizados na confecção do protótipo de secador solar de baixo custo e de exposição direta foram adquiridos no mercado local do município de Senhor do Bonfim/BA.

### 2.1 Construção do secador solar e avaliação da eficiência térmica

A estrutura do secador foi projetada e construída utilizando estacas de eucalipto tratado, do tipo 6x8, que foram cortadas em formato de meia-lua para proporcionar maior estabilidade (Figura 1). Para compor a estrutura principal, foram preparados quatro pedaços de madeira com 92 centímetros de comprimento, que serviram como suportes verticais, e oito pedaços com 40 centímetros, que formaram as travessas horizontais. Esses elementos foram montados em forma de cavalete, resultando em uma estrutura com 92 centímetros de altura, 40 centímetros de largura e 40 centímetros de comprimento, dimensões que correspondiam exatamente ao tamanho da câmara de secagem.

Figura 1 – Protótipo de secador solar de baixo custo desenvolvido.

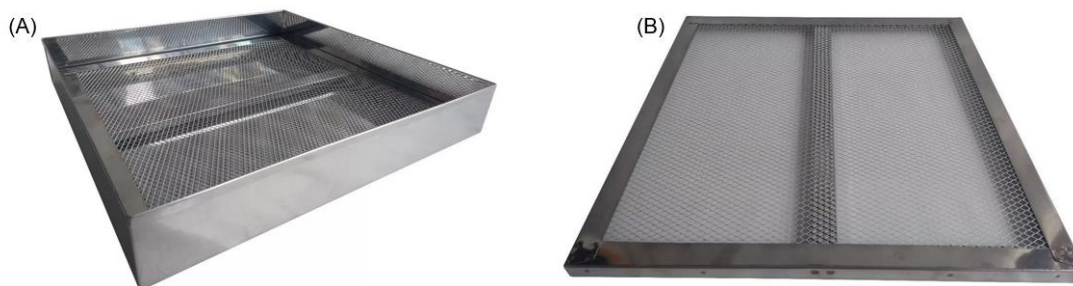


Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

A câmara de secagem do secador solar foi adaptada utilizando um escorredor de fritura confeccionado em aço inoxidável, com dimensões de 40 x 40 x 6 cm (Figura 2). Este equipamento, originalmente projetado para o uso culinário, apresenta uma estrutura resistente e de fácil higienização, características que o tornam adequado para processos de desidratação de alimentos. A distância entre a tela e o fundo da bandeja é de 1,5 cm, permitindo uma circulação de ar de forma eficiente.

A principal vantagem do uso do escorredor está em sua malha metálica (0,5 cm de altura do orifício), que permite uma boa circulação de ar ao redor do material a ser seco, promovendo uma secagem uniforme e eficiente. Além disso, o aço inoxidável é resistente à corrosão e ao calor, garantindo durabilidade e contribuindo para a manutenção das propriedades do produto. A escolha desse material também foi motivada pelo baixo custo e pela disponibilidade no mercado, características que reforçam o caráter sustentável e acessível da tecnologia desenvolvida.

Figura 2 – Escorredor de fritura de aço inoxidável (A) bandeja com dimensões de 40x40x6cm (B) telas com orifícios triangulares com 0,5 cm de altura.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Essa adaptação demonstra a viabilidade de utilizar materiais alternativos e de fácil acesso para pequenos produtores, favorecendo a implementação de tecnologias apropriadas em sistemas de produção rural.

Para a instalação da tampa articulada de acrílico (Figura 3), foram utilizadas duas abraçadeiras inoxidáveis, o que garantiu uma fixação firme e durável. A tampa foi confeccionada em acrílico transparente, permitindo uma boa visualização do interior do secador sem a necessidade de abertura constante. Este design priorizou tanto a funcionalidade quanto a praticidade, proporcionando uma estrutura sólida e eficiente para o uso pretendido.

Figura 3 - Tampa articulada a câmara de secagem para entrada de matéria-prima e saída de produto acabado.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

A eficiência do processo foi avaliada mediante o monitoramento da temperatura interna do secador com uso de um termômetro a infravermelho. Além disso, a temperatura do ambiente e a radiação solar foram obtidas a partir de dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes à Estação Automática de Senhor do Bonfim/BA (Latitude: -10,443056; Longitude: -40,148333; Altitude: 532,09m; Data de instalação: 26/03/2008; Código: A428).



## 2.2 Processamento da banana

Foram utilizadas bananas da variedade 'Prata', adquiridas junto a agricultores familiares da cidade de Senhor do Bonfim/BA. Os frutos foram selecionados conforme o grau de maturação, optando-se por aqueles com 100% da casca amarelada, ausência de injúrias e firmeza adequada. Após a seleção, as bananas foram armazenadas sob refrigeração em um cooler plástico.

O processamento iniciou-se com a higienização dos frutos, que foram lavados em água corrente e submetidos à sanitização com solução aquosa contendo 50 ppm de cloro ativo por 15 minutos. Em seguida, os frutos foram novamente enxaguados para remoção do excesso de cloro. As bananas foram descascadas manualmente com facas de aço inox e fatiadas em rodela uniformes. O processamento foi realizado em ambiente controlado para minimizar a oxidação e garantir a uniformidade do produto.

A secagem solar ocorreu entre os dias 05 e 06/12/2024, entre 8 e 17h. Durante esse período a precipitação pluviométrica foi de 0,0 mm e a umidade relativa do ar média de 50%. Durante o processo, no período noturno os frutos foram armazenados em dessecadores, e submetidos à radiação solar no dia seguinte até o término do processo.

## 2.3 Secagem das bananas em desidratador convencional

A secagem das bananas foi conduzida em um desidratador convencional, utilizando uma estufa com circulação e renovação de ar forçada. Os procedimentos seguidos foram os mesmos empregados na secagem solar, garantindo a uniformidade das condições experimentais. Para assegurar uma comparação precisa, a temperatura adotada no desidratador convencional foi a média da temperatura registrada durante a secagem solar ( $30 \pm 5^\circ\text{C}$ ).

Dessa forma, este estudo permitiu avaliar o desempenho das duas metodologias sob condições térmicas equivalentes, proporcionando uma análise detalhada da eficiência e das características finais do produto obtido em cada processo.

## 2.4 Cinética de secagem e ajuste de modelos matemáticos

Para construção da cinética de secagem, a matéria-prima foi avaliada quanto ao teor de umidade por secagem direta em estufa com circulação de ar forçado a  $105^\circ\text{C}$ , até atingir peso constante (IAL, 2008). E para avaliação da taxa de secagem natural (em secador solar) e artificial (em estufa), as fatias foram retiradas em intervalos regulares de tempo para determinação da massa das amostras utilizando uma balança semi-analítica com precisão de 0,01 g. Os dados foram utilizados para avaliar a razão de umidade em função do tempo de secagem, que foi finalizada quando houve equilíbrio de umidade em base seca (% b.s.), e a partir dos dados obtidos, foram expressos na forma de razão de umidade (Equação 1).

$$RU = \frac{(U - U_e)}{(U_i - U_e)} \quad (1)$$

Em que: RU – razão de umidade (adimensional); U – umidade contida no tempo t (% b.s.);  $U_e$  – Umidade de equilíbrio (% b.s.), e  $U_o$  – Umidade inicial (% b.s.).

Com auxílio do *software* SigmaPlot versão 10.0, utilizando-se de análise de regressão não linear, os modelos matemáticos: Aproximação da Difusão; Exponencial de Dois Termos; Henderson e Pabis; Lewis; Logarítmico; Midilli e Page (Tabela 1), foram ajustados aos dados

experimentais das curvas de secagem. E utilizando o mesmo *software*, foram construídas as curvas e cinéticas de secagem.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem.

Modelo Matemático	Equação	Referência
Aproximação da Difusão	$RU = a.exp(-k.t) + (1 - a).exp(-k.b.t)$	Faria et al. (2012)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a.exp(-k.t) + (1 - a).exp(-k.a.t)$	Ferreira et al. (2012)
Henderson e Pabis	$RU = a.exp(-k.t)$	Galdino et al. (2016)
Lewis	$RU = exp(-k.t)$	Kaleta; Górnicki (2010)
Logarítmico	$RU = a.exp(-k.t) + c$	Diógenes et al. (2013)
Midilli	$RU = a.exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli et al. (2002)
Page	$RU = exp(-k.t^n)$	Galdino et al. (2016)

Onde: RU, razão de umidade, adimensional; t, tempo de secagem, s; k, constante de secagem específica para o modelo,  $s^{-1}$ ; e a, b, c, n – coeficientes do modelo. Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Para avaliar qual modelo produziu os melhores resultados, utilizou-se como parâmetros o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o desvio quadrático médio (Equação 2):

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RU_{pred} - RU_{exp})^2}{n}} \quad (2)$$

Em que: DQM – desvio quadrático médio;  $RU_{pred}$  – razão de umidade predito pelo modelo;  $RU_{exp}$  – razão de umidade experimental e n – número de observações.

## 2.5 Avaliação dos frutos *in natura* e desidratados: parâmetros físico-químicos e cor

Os frutos *in natura* e desidratado em secador solar e estufa foram avaliados quanto aos parâmetros de: teor de água determinado por secagem direta em estufa com convecção forçada de ar, em temperatura de  $105 \pm 1^\circ C$ , até peso constante; atividade de água ( $A_w$ ) determinada utilizando-se o equipamento Aqualab CX-2T, Decagon a  $25^\circ C$ ; e cor, que foi aferida, utilizando-se um colorímetro digital portátil da marca Konica Minolta, modelo CR 10, com sistema de cor Cielab, sendo obtidos os parâmetros  $L^*$ , que indica luminosidade ou brilho e varia do claro (branco; 100) ao escuro (0:escuro/opaco);  $a^*$ , que indica a cromaticidade no eixo de cor verde(-) para vermelha (+); e  $b^*$ , que indica a cromaticidade no eixo da cor azul (-) para amarela (+) (LOZANO, 1978). As leituras de cor foram realizadas em quadruplicata.

## 2.6 Análise estatística

Os graus de normalidade dos dados foram avaliados pelo teste de Shapiro-Wilk, e os dados experimentais da avaliação físico-química e da cor foram submetidos a análise de variância em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos e quatro repetições. A comparação das médias dos tratamentos foi feita por teste de hipótese, utilizando o teste Tukey em nível de 5% ( $p < 0,05$ ) de probabilidade, utilizando o *software* Sisvar Versão 5.6 (FERREIRA, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação da viabilidade econômica do secador solar desenvolvido

A análise dos custos do secador mostra que o projeto é acessível, considerando o baixo investimento necessário para sua construção (Tabela 2). O item mais dispendioso é o escorredor de fritura em aço inoxidável, que representa aproximadamente 44% do custo total. Esse investimento se justifica pela durabilidade e eficiência proporcionadas pelo material, além de sua compatibilidade com o processo de secagem.

Tabela 2 - Custos para a Construção do Secador

Item	Custo Unitário (R\$)	Quantidade	Custo Total (R\$)
Mourão/Caibro de eucalipto tratado, 06 a 08 cm de diâmetro com 2,20 m de comprimento	8,50	2 Unidades	19,00
Placa chapa acrílico transparente cristal 50cm X 50cmX3mm	80,00	1 Unidade	80,00
Secador escorredor de frituras 40x40x6cm	103,00	1 Unidade	103,00
Pregos	0,50	24 Unidades	12,00
Parafusos para corredeia e dobradiça 4.0x16mm	1,00	8 Unidades	8,00
Dobradiça de ferro zincada 2"	2,00	2 Unidades	4,00
Total	-	-	226,00

Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Outros itens, como o eucalipto e a tampa de acrílico, também contribuem significativamente para os custos, mas são essenciais para garantir a estabilidade e funcionalidade do protótipo. Os demais materiais, como pregos, parafusos e dobradiças, representam uma parcela menor do orçamento, reforçando a viabilidade econômica do projeto.

Portanto, o custo total de R\$ 226,00 evidencia a possibilidade de replicação do secador por pequenos produtores, mantendo o foco na sustentabilidade e acessibilidade, características fundamentais para promover inovações tecnológicas no meio rural. Em contrapartida, secadores comerciais disponíveis no mercado podem apresentar custos significativamente maiores, especialmente para modelos de maior capacidade ou funcionalidades avançadas.

Equipamentos básicos para desidratação de frutas variam amplamente em preço, mas modelos intermediários e médios, projetados para maior eficiência, frequentemente se situam na faixa de R\$ 1.000,00 a R\$ 10.000,00. Essa faixa reflete os valores encontrados no mercado brasileiro para equipamentos que oferecem controle automatizado de temperatura e ventilação. Esses equipamentos, fabricados principalmente com aço inoxidável e sistemas automatizados de controle de temperatura e ventilação, proporcionam maior durabilidade e eficiência em operações contínuas (PANDEY; KUMAR; SHARMA, 2024; SALEHI, 2024.). No entanto, a escolha do equipamento depende das necessidades do usuário e do contexto de aplicação, sendo possível encontrar alternativas mais econômicas para produções menores, embora com limitações em termos de controle e capacidade.

O uso de energia solar elimina custos operacionais, favorecendo pequenos agricultores com recursos limitados. Essa característica sustentável, somada ao uso de materiais simples e duráveis, como eucalipto tratado e acrílico, reforça a possibilidade de replicação em comunidades rurais, promovendo uma alternativa prática e ambientalmente responsável para a secagem de frutas.

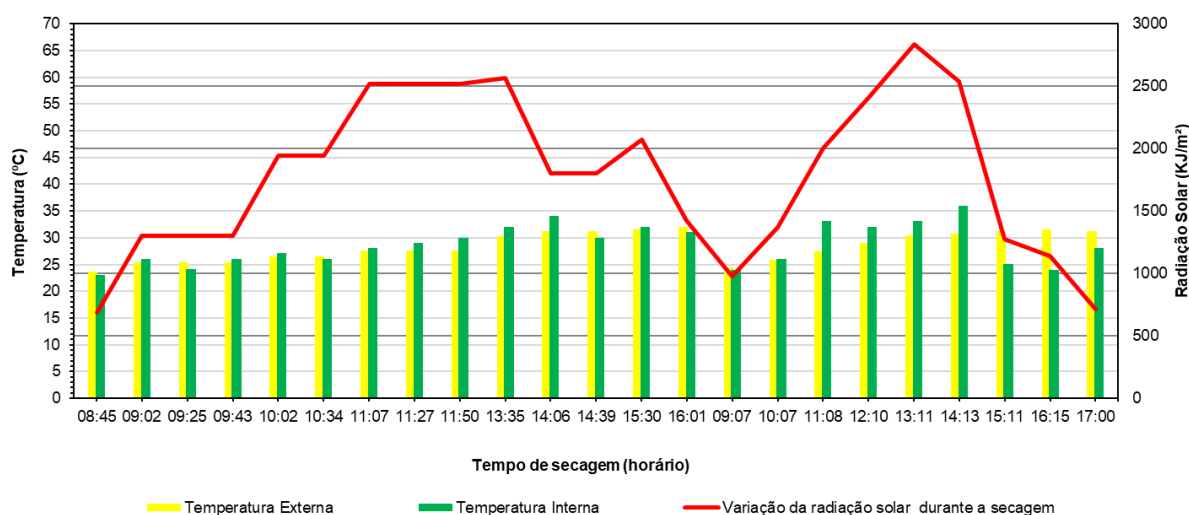
Comparativamente, o protótipo solar se destaca como uma solução sustentável e econômica, ideal para agricultores familiares (COELHO et al., 2020; COELHO et al., 2019).

Apesar de um tempo de secagem maior e menor controle técnico em relação aos equipamentos comerciais, sua acessibilidade e ausência de custos operacionais o tornam adequado para pequenas produções (KEMP, 2024). Já os secadores comerciais oferecem maior eficiência e produtividade, mas com custos iniciais e operacionais elevados, sendo mais apropriados para operações em maior escala (KEMP, 2024). Assim, o protótipo cumpre seu objetivo de atender às necessidades de pequenos produtores de forma acessível e sustentável.

### 3.2 Avaliação da eficiência do protótipo de secador solar de baixo custo desenvolvido

A temperatura interna variou entre 23,09°C e 36,01°C, demonstrando que o secador foi capaz de elevar e manter uma temperatura superior à externa durante boa parte do tempo (Figura 4). A maior diferença entre a temperatura interna e externa foi de aproximadamente 5,69°C (às 11h08min), indicando o ponto de maior eficiência térmica do sistema.

Figura 4 - Variação da temperatura interna e externa do secador solar em relação ao tempo de secagem, acompanhada da variação da radiação solar ao longo do dia.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

O secador foi capaz de manter temperaturas internas superiores à externa por períodos significativos, o que indica um bom desempenho na captura e retenção de calor. Contudo, em períodos de baixa radiação, a diferença entre as temperaturas diminuiu, sugerindo que melhorias no isolamento ou uso de materiais mais eficientes poderiam aumentar a eficácia (CHOJNACKA *et al.*, 2021; MOHANA *et al.*, 2020).

O desempenho está em conformidade com estudos que demonstram que temperaturas internas entre 30°C e 50°C são adequadas para a secagem de produtos agrícolas, dependendo do tipo de produto (LAMIDI *et al.*, 2019).

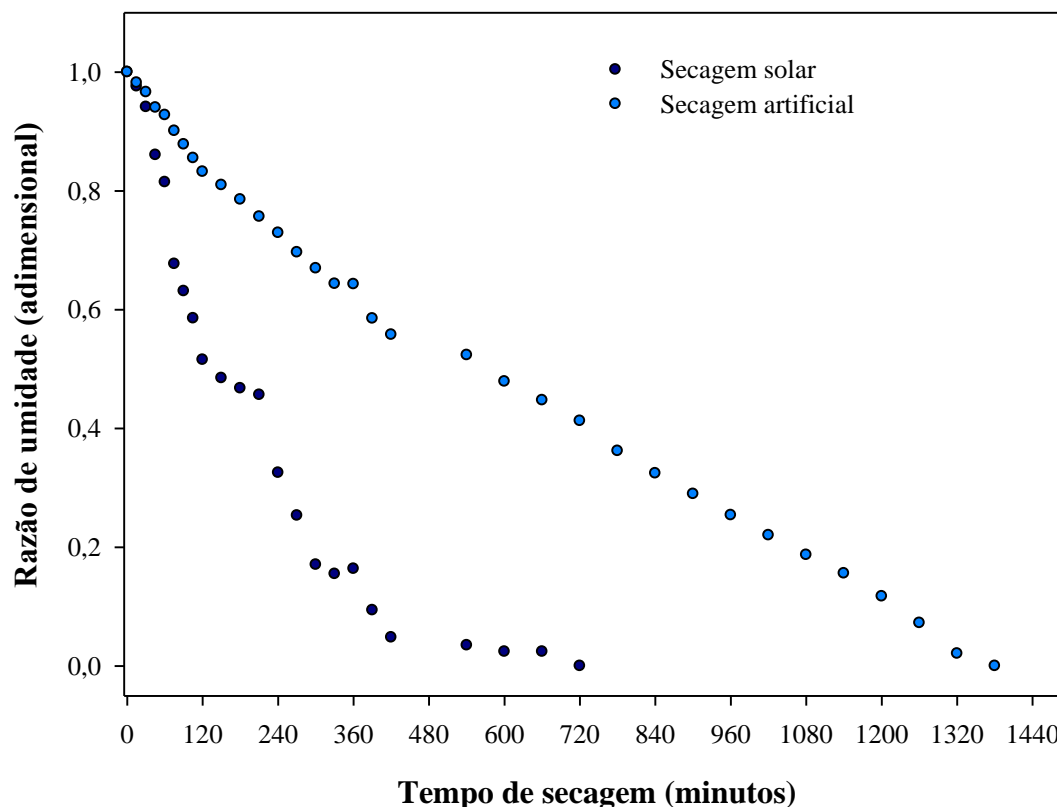
Pandey, Kumar e Sharma (2024) destacam que secadores solares passivos podem ser otimizados utilizando materiais com alta capacidade de absorção de calor e sistemas de ventilação natural para melhorar o fluxo de ar e acelerar a remoção da umidade. Kherrafi *et al.* (2024) recomendam o uso de materiais translúcidos com alta transmitância solar, como o acrílico utilizado, para maximizar a captação de energia. Hashem *et al.* (2024) enfatizam a importância de manter temperaturas consistentes dentro do intervalo ideal de secagem para evitar danos ao produto ou secagem ineficaz.



### 3.3 Cinética de secagem e ajuste de modelos matemáticos

A curva apresentada na Figura 5 mostra a relação entre a Razão de Umidade (RU) e o Tempo de Secagem (em minutos) para a secagem solar das bananas ‘Prata’ em um protótipo de baixo custo e para a secagem artificial em estufa.

Figura 5 - Curva de secagem solar e artificial das bananas ‘Prata’ utilizando um protótipo de baixo custo e secagem artificial em estufa. A razão de umidade (adimensional) é apresentada em função do tempo de secagem (minutos), evidenciando as fases de remoção da água livre, capilar e adsorvida.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

A curva inicia com uma Razão de Umidade próxima a 1, refletindo a umidade inicial da amostra ( $71,90 \pm 1,91\%$  b.u.). Neste estágio, a disponibilidade de água livre é alta, permitindo uma taxa de secagem inicial elevada. A secagem artificial, por contar com um controle mais preciso de temperatura e fluxo de ar, remove a umidade superficial de maneira mais uniforme e previsível em comparação à secagem solar, que depende das condições climáticas (MUJUMDAR; DEVAHASTIN, 2000; ONWUDE *et al.*, 2016).

Com o aumento do tempo de secagem, observa-se uma transição na taxa de remoção de umidade, que se torna mais lenta devido à remoção da água capilar e adsorvida. Esse comportamento está relacionado à redução da pressão de vapor da água no material, tornando o processo mais dependente da difusão (LI; RAMASWAMY, 2020; ZHANG; ZHANG, 2022). A secagem solar se estende por aproximadamente 600 minutos até atingir uma umidade final de 16,13% b.u., enquanto a secagem artificial se prolonga até 1380 minutos, alcançando uma umidade final de aproximadamente 12,64% b.u.

A maior velocidade de secagem observada no processo solar pode estar diretamente associada às variações de temperatura interna do sistema ao longo do dia. Como indicado no gráfico, a temperatura interna se manteve constantemente acima da temperatura externa, alcançando valores elevados durante os períodos de maior radiação solar. Essa condição

favoreceu uma taxa de evaporação mais rápida, acelerando a remoção da água livre da amostra. Em contrapartida, a secagem artificial, apesar de permitir um controle mais preciso da temperatura, operou em condições térmicas mais moderadas, o que resultou em um tempo total mais longo para atingir uma umidade inferior (SHEN *et al.*, 2024).

O comportamento observado está alinhado com estudos sobre secagem de frutas tropicais, que destacam a secagem solar como uma alternativa viável e sustentável para pequenos produtores, especialmente em regiões de alta radiação solar, como o Brasil (MATIAS GONÇALVES *et al.*, 2023). No entanto, a secagem artificial, apesar de exigir um maior tempo total, proporciona um controle mais preciso e eficiente sobre o teor de umidade final, o que pode ser uma vantagem para a conservação a longo prazo e a padronização do produto.

O uso de protótipos de baixo custo na secagem solar é particularmente relevante para a agricultura familiar, pois reduz o desperdício pós-colheita e agrega valor ao produto final (SILVA, 2022). O protótipo desenvolvido se mostrou eficiente na redução da umidade da banana 'Prata' para níveis adequados de armazenamento. A obtenção de uma umidade final de 16,13% b.u. na secagem solar garante a conservação do produto e minimiza os riscos de proliferação microbiana, enquanto a secagem artificial, ao atingir aproximadamente 13% b.u. de umidade, pode potencialmente oferecer maior estabilidade ao armazenamento. No entanto, melhorias no sistema podem ser exploradas para uniformizar o processo e reduzir ainda mais o tempo de secagem, especialmente no caso da secagem solar (ADNOUNI *et al.*, 2023; PANDEY; KUMAR; SHARMA, 2024).

Os dados apresentados indicam que o ajuste dos modelos matemáticos à secagem dos frutos de banana 'Prata' em secador solar e artificial foi satisfatório (Tabela 3), com altos valores de coeficiente de determinação ( $R^2 \geq 0,978$ ) e baixos desvios quadráticos médios ( $DQM \leq 0,070$ ). Esses resultados são comparáveis a estudos prévios que destacam a adequação de modelos não lineares para descrever processos de secagem de frutas em condições similares. Além disso, a concordância entre os valores observados e os valores preditos pelos modelos reforça sua aplicabilidade para prever a cinética de secagem. A validação estatística desses ajustes sugere que os modelos podem ser empregados com confiança em processos industriais e experimentais.

Entre os modelos testados, o modelo Midilli apresentou o melhor desempenho para ambas as secagens, com valores de  $R^2 = 0,988$  e  $DQM = 0,037$  na secagem solar e  $R^2 = 0,998$  e  $DQM = 0,001$  na secagem artificial. A alta precisão desse modelo está associada à sua flexibilidade em descrever curvas de secagem complexas, permitindo a inclusão de coeficientes adicionais que capturam melhor as dinâmicas do processo (MIDILLI *et al.*, 2002). O modelo Logarítmico também apresentou um bom ajuste, especialmente para a secagem solar, reforçando sua aplicabilidade na descrição da perda de umidade em frutos com alto teor inicial de água. Esses achados corroboram pesquisas anteriores que indicam a relevância de modelos empíricos para a previsão de processos de secagem, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes no setor agroindustrial.

A secagem artificial, apesar de apresentar um tempo total mais longo, resultou em um menor teor final de umidade (~13% b.u.) e em um ajuste matemático ainda mais preciso, possivelmente devido ao controle mais uniforme das condições do processo. O modelo de Midilli, na secagem artificial, exibiu um DQM extremamente baixo (0,001), indicando uma excelente capacidade preditiva (Tabela 3). Esse nível de precisão pode ser vantajoso para a padronização de processos, reduzindo variabilidades indesejadas no produto final. Assim, os resultados evidenciam a importância de ajustes matemáticos rigorosos para otimizar a eficiência e qualidade da secagem.

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos ajustados aos dados de secagem de rodela de frutos de banana 'Prata' em secador solar e artificial; coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio quadrático médio (DQM).

Modelo	Parâmetros					R <sup>2</sup>	DQM
	a	b	k	c	n		
Secagem solar							
Aproximação da difusão	-0,0971	0,0574	0,0970	-	-	0,986	0,039
Exponencial de dois termos	1,6920	-	0,0067	-	-	0,986	0,004
Handerson e Pabis	1,0597	-	0,0053	-	-	0,983	0,004
Logaritmo	1,1135	-	0,0045	0,0045	-	0,988	0,037
Midilli	1,0247	-6,89.10 <sup>-5</sup>	0,0034	-	1,0677	0,988	0,037
Lewis						0,978	0,004
Page	-	-	0,0020	-	1,1699	0,986	0,039
Secagem artificial							
Aproximação da difusão	-0,3273	0,9844	0,0023	-	-	0,984	0,004
Exponencial de dois termos	1,645	-	0,0019	-	-	0,984	0,005
Handerson e Pabis	1,018	-	0,0015	-	-	0,978	0,007
Logaritmo	107,2		6,53.10 <sup>-6</sup>	-106,3	-	0,986	0,044
Midilli	1,020	-	0,0070	-	0,6241	0,998	0,001
Lewis	-	-	1,42.10 <sup>-3</sup>	-	-	0,977	0,070
Page	-	-	5,86.10 <sup>-4</sup>	-	1,137	0,983	0,054

Em que: RU, razão de umidade, adimensional; t, tempo de secagem, min; k,  $k_0$ ,  $k_1$ , constantes de secagem específicas para o modelo,  $\text{min}^{-1}$ ; a, b, c, n, coeficientes do modelo. Fonte: Elaborado pelos Autores. (2025)

O modelo Exponencial de dois termos também demonstrou um ajuste satisfatório em ambas as condições, com  $R^2 = 0,986$  para a secagem solar e  $R^2 = 0,984$  para a artificial, sendo amplamente utilizado na literatura devido à sua simplicidade e eficiência na modelagem de processos de transferência de massa em materiais porosos (ONWUDE *et al.*, 2016). Esse resultado sugere que tanto a secagem solar quanto a artificial seguem padrões característicos de perda de umidade governados por difusão.

Em contrapartida, o modelo de Lewis apresentou o menor desempenho em ambas as condições, com o menor coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,978$  para a secagem solar e  $R^2 = 0,977$  para a artificial), reforçando sua limitação na representação precisa da cinética de secagem de frutas tropicais. Essa menor precisão pode ser atribuída à simplicidade estrutural do modelo, que não considera coeficientes adicionais que poderiam melhorar a descrição do fenômeno (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

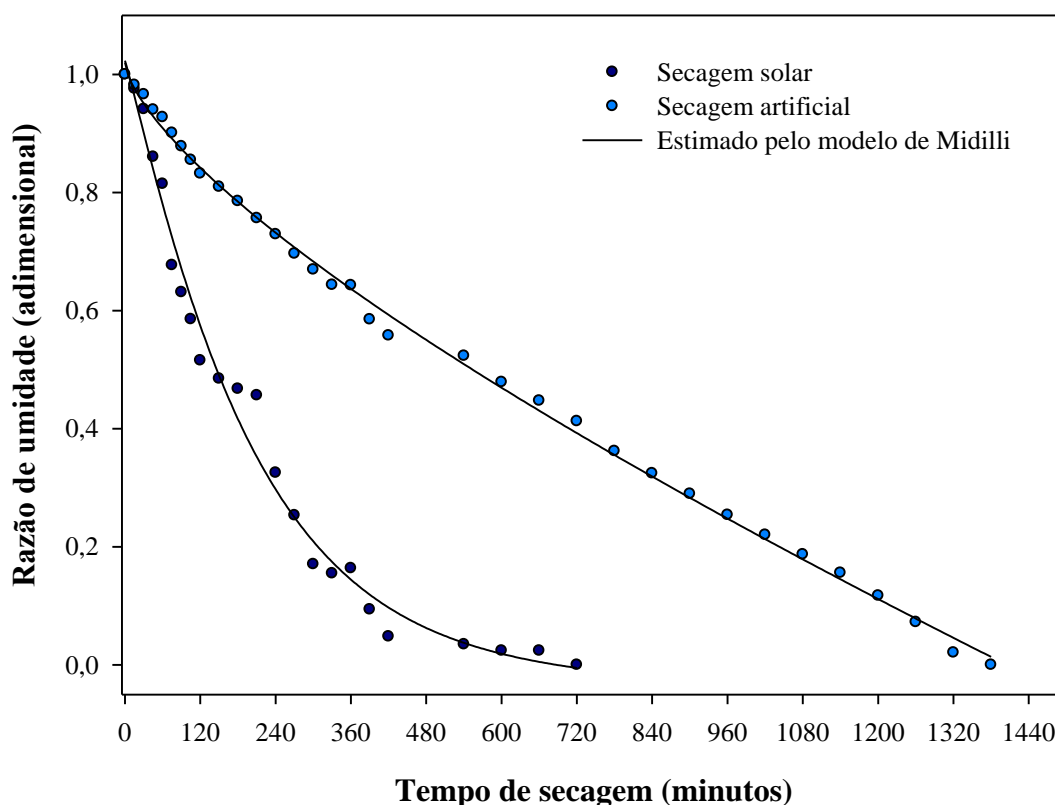
Os valores dos coeficientes dos modelos (a, b, c, n) indicam a interação entre os parâmetros físicos do material e as condições de secagem, demonstrando que ajustes específicos podem ser necessários dependendo do tipo de fruta e do método utilizado. O melhor ajuste do modelo de Midilli está diretamente relacionado à rápida perda de umidade nos estágios iniciais do processo, tornando a curva de secagem mais acentuada e, portanto, mais bem representada matematicamente (GONELI *et al.*, 2014). Esse comportamento é particularmente relevante para produtos com elevados teores de água, como as frutas.

Dessa forma, o modelo de Midilli destacou-se como o mais adequado para descrever o processo de secagem dos frutos de banana 'Prata', tanto no secador solar quanto no artificial,

seguido pelo modelo logarítmico. Isso reforça a importância da escolha criteriosa de modelos matemáticos que considerem as características específicas do produto e das condições de secagem, garantindo resultados precisos e reprodutíveis.

Pode-se verificar, na Figura 6, as curvas geradas pelos ajustes do modelo matemático de Midilli ajustado aos dados experimentais da cinética de secagem de rodela de banana 'Prata' com tanto com uso de energia térmica solar quanto de forma artificial.

Figura 6 - Dados observados e estimado pelo modelo de Midilli para descrever as curvas de secagem de rodela de banana 'Prata' utilizando sob secagem solar e artificial.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Coelho *et al.* (2019) estudaram a cinética de secagem da banana 'Terra' com um secador solar de baixo custo, observando que o processo total levou 18 horas, evidenciando eficiência no controle térmico do equipamento. Entre os modelos matemáticos analisados, o de Dois Termos destacou-se como o mais adequado para descrever as variações de umidade durante a secagem, proporcionando uma representação precisa das curvas de secagem.

Segundo Khan *et al.* (2022), a importância da modelagem não é apenas fornecer previsões de processos, mas também extrair mais detalhes e obter esclarecimentos e informações sobre o processo de secagem de produtos agrícolas. O desenvolvimento de novos equipamentos está diretamente ligado à necessidade específica de cada particularidade, e os modelos matemáticos contribuem significativamente para entender a complexidade, sofisticação e aplicação. Portanto, não há nenhum tipo universalmente válido para modelar o comportamento de secagem, que funcione bem para todos os materiais.

### 3.5 Parâmetros físico-químicos e cor da banana 'Prata' *in natura* e desidratada em secador solar e em estufa

A análise dos parâmetros físico-químicos e de cor revela impactos significativos da desidratação de frutos de banana 'Prata', destacando diferenças marcantes entre os métodos utilizados (secador solar e estufa). Esses resultados têm implicações diretas na qualidade sensorial e na aceitação comercial do produto (Tabela 4).

A drástica redução da umidade das bananas *in natura* (71,90%) para valores inferiores a 16% nas amostras desidratadas confirma a eficiência dos processos de secagem na remoção de água, fator essencial para a conservação do alimento. A umidade final das bananas desidratada na estufa (12,64%) foi significativamente menor que a obtida no secador solar (15,28% b.u.), indicando que a estufa proporciona um processo mais agressivo e eficiente na eliminação da água.

Não houve diferença estatística significativa no teor de umidade das bananas desidratadas pelos diferentes métodos (Tabela 4). De acordo com a legislação brasileira vigente (BRASIL, 2005), que estabelece um limite máximo de 25% de umidade (base úmida) para produtos desidratados, as bananas secas tanto no secador solar quanto na estufa atenderam às exigências normativas, apresentando teores abaixo do limite permitido. Conforme observado por Jesus *et al.* (2005), a umidade influencia diretamente os atributos de textura da banana-passa, sendo que a redução do teor de umidade está associada ao aumento da firmeza do produto.

Além disso, a atividade de água ( $A_w$ ) caiu de 0,76 para 0,56 em ambas as técnicas de secagem, reduzindo a disponibilidade de água livre para reações microbiológicas e químicas. Esse efeito é crucial para a estabilidade microbiológica do produto, pois alimentos com  $A_w$  abaixo de 0,6 apresentam menor suscetibilidade ao crescimento de microrganismos deteriorantes (TAPIA; ALZAMORA; CHIRIFE, 2020). No entanto, é importante notar que uma secagem excessiva pode comprometer a textura e resultar em um produto muito rígido, o que pode impactar negativamente a aceitação do consumidor (MARTÍNEZ *et al.*, 2024).

Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos e de cor de bananas 'Prata' *in natura* e após desidratação em diferentes métodos

Parâmetro	Bananas <i>in natura</i>	Bananas desidratada em secador solar	Bananas desidratada em estufa
Umidade (% b.u.)	71,90 ± 1,91 a	15,28 ± 2,25 b	12,64 ± 0,58 b
Atividade de água ( $A_w$ )	0,76 ± 0,01 a	0,56 ± 0,01 b	0,56 ± 0,01b
L*	72,01 ± 3,00 a	57,55 ± 2,45 b	50,66 ± 2,49 c
a*	- 1,11 ± 0,60 c	3,75 ± 0,26 a	3,07 ± 0,43 b
b*	24,37 ± 1,35 a	20,00 ± 1,36 b	16,43 ± 0,77 c

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Os valores dos parâmetros de cor (L\*, a\*, b\*), essenciais para a aparência do produto e sua aceitação comercial, sofreram alterações significativas com a desidratação. As bananas *in natura* apresentavam o maior valor de L\* (72,01), indicando um produto claro e visualmente atrativo. A secagem resultou em escurecimento, sendo mais intenso na estufa (50,66) do que no secador solar (57,55). Esse escurecimento pode ser atribuído a reações de Maillard e oxidação enzimática, que são exacerbadas por temperaturas elevadas e maior tempo de exposição ao calor (VHANGANI; VAN WYK, 2021).

O aumento do valor de a\* de -1,11 (ligeiramente esverdeado) para valores positivos após a desidratação indica um deslocamento da coloração para tons avermelhados. As



bananas desidratadas no secador solar apresentou maior intensidade dessa mudança (3,75) em comparação à desidratada na estufa (3,07), sugerindo que a exposição ao sol pode intensificar reações oxidativas em pigmentos como carotenoides e compostos fenólicos (RODRÍGUEZ-RAMÍREZ *et al.*, 2021).

A redução expressiva do valor de  $b^*$  (de 24,37 na fruta *in natura* para 16,43 na estufa) revela uma significativa perda de pigmentos amarelos, como luteína e  $\beta$ -caroteno (NETLAK *et al.*, 2023). Esse efeito foi menos acentuado no secador solar ( $b^* = 20,00$ ), o que indica que a desidratação por esse método pode preservar melhor os compostos responsáveis pela coloração amarela característica das bananas.

Os dados evidenciam que o secador solar foi menos agressivo na degradação da cor e na perda de umidade em comparação com a estufa. Isso pode ser atribuído à menor temperatura média e à presença de ventilação natural, que reduz a formação de compostos escurecedores. Por outro lado, a estufa garantiu uma secagem mais intensa, resultando em um produto mais seco e, potencialmente, com maior estabilidade microbiológica. Entretanto, a degradação da cor pode comprometer a aceitação do consumidor, já que produtos excessivamente escurecidos tendem a ser menos atrativos visualmente (LIU *et al.*, 2025).

Na Figura 7A, as fatias de banana recém-preparadas apresentam uma coloração amarela clara e uniforme, com textura visivelmente úmida e sem sinais de oxidação ou escurecimento. Essa aparência é característica da fruta fresca, com alto teor de água e superfície brilhante devido à umidade natural. Enquanto Figura 7B, as bananas submetidas à secagem solar apresentam uma coloração amarronzada mais intensa, especialmente nas regiões centrais, além de um encolhimento perceptível. Isso indica a perda de umidade e possíveis reações oxidativas decorrentes da exposição ao ar e à luz solar. A superfície aparenta uma leve rugosidade, possivelmente devido à desidratação gradual do tecido da fruta. Já na Figura 7C, as bananas desidratadas em secador convencional apresentam um aspecto semelhante ao do processo solar, mas com uma coloração um pouco mais uniforme e menos escurecida. Isso pode estar relacionado ao controle mais rigoroso da temperatura e umidade no sistema de secagem artificial, reduzindo a oxidação enzimática. A textura parece ser mais consistente e rígida, um indicativo de uma desidratação mais rápida e homogênea.

Figura 7 - Visual das fatias de bananas em diferentes estágios de secagem: (A) bananas *in natura* recém-cortadas; (B) desidratadas por secagem solar; (C) desidratadas em secador convencional.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

Em resumo, a análise visual sugere que ambos os métodos de secagem promovem alterações significativas na aparência das bananas, sendo que o método convencional parece resultar em uma coloração menos escurecida e uma desidratação mais homogênea. A secagem solar, por outro lado, pode levar a variações na textura e coloração devido à exposição a fatores ambientais incontroláveis, como a radiação solar direta e a umidade relativa do ar.

Os resultados têm implicações diretas para a indústria alimentícia e para produtores que desejam comercializar banana desidratada. A escolha do método de secagem deve considerar um equilíbrio entre eficiência de remoção de água, preservação da cor e

manutenção das características sensoriais. Se o objetivo for estabilidade microbiológica e maior tempo de prateleira, a estufa pode ser a melhor opção. Porém, se a qualidade visual e sensorial for o principal critério, o secador solar se mostra mais vantajoso.

#### 4. CONCLUSÃO

O protótipo de secador solar desenvolvido demonstrou eficiência na desidratação das bananas ‘Prata’, reduzindo significativamente a umidade e a atividade de água, tornando o produto mais estável para armazenamento. Embora a secagem em estufa tenha resultado em menor umidade final, o secador solar se mostrou uma alternativa sustentável e de baixo custo, especialmente para pequenos produtores.

As análises físico-químicas evidenciaram que ambos os métodos alteraram significativamente a cor da banana, sendo o escurecimento mais intenso na estufa, o que pode impactar a aceitação do consumidor. Além disso, o modelo de Midilli foi o mais adequado para descrever a cinética de secagem, reforçando a confiabilidade do processo.

Comparado ao método convencional em estufa, o secador solar apresentou vantagens em termos de economia de energia e menor degradação da cor, sem comprometer a qualidade microbiológica da fruta desidratada. O estudo destaca a importância de tecnologias sustentáveis para reduzir perdas pós-colheita e ampliar as possibilidades de comercialização da banana desidratada.

Pesquisas futuras podem focar na otimização do design do secador para aprimorar a eficiência térmica, ampliar sua aplicabilidade a diferentes produtos agrícolas e avaliar sua performance na secagem de outras frutas.

#### 5. REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, Fernanda Rezende et al. Effect of Ultrasound and Osmotic Dehydration as Pretreatments on the Infrared Drying of Banana Slices. **Food Technology and Biotechnology**, v. 62, n. 3, p. 384-396, 2024.

ACAR, Canan; DINCER, Ibrahim; MUJUMDAR, Arun. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. **Drying Technology**, v. 40, n. 6, p. 1029-1050, 2022.

ADNOUNI, M. et al. Computational modelling for decarbonised drying of agricultural products: Sustainable processes, energy efficiency, and quality improvement. **Journal of Food Engineering**, v. 338, p. 111247, 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº. 272, de 22 de setembro de 2005. **Dispõe sobre o regulamento técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis**. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.vigilanciasanitaria.sc.gov.br/index.php/download/category/187-frutas-ehortalicas-emconserva?download=906:resolucao-rdc-n272-2005-caracteristicas-minimas-dequalidade-a-que-devem-obedecer-osprodutos-de-vegetais>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

CANTON, Helen. Food and agriculture organization of the United Nations—FAO. **In: The Europa directory of international organizations 2021**. Routledge, 2021. p. 297-305.

CASTRO, Ana María; MAYORGA, Edgar Yesid; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of food engineering**, v. 223, p. 152-167, 2018.

CHIBUZO, Nwankwo S. et al. Technological advancements in the drying of fruits and vegetables: A review. **African Journal of Food Science**, v. 15, n. 12, p. 367-379, 2021.

CHOJNACKA, Katarzyna et al. Improvements in drying technologies-Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. **Journal of Cleaner Production**, v. 320, p. 128706, 2021.

COELHO, Bruno Emanuel Souza et al. Ajuste de modelos matemáticos a curva de secagem da banana cv. Terra com uso de energia solar térmica sob exposição direta. **Revista Craibeiras de Agroecologia**, v. 4, n. 1, p. e7688-e7688, 2019.

COELHO, Bruno Emanuel Souza et al. Cinética de secagem e avaliação físico-química da goiaba desidratada em um protótipo de secador solar. **Nucleus**, v. 17, n. 2, 2020.

DIÓGENES, Adelino de Melo Guimarães et al. Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.

FARIA, Rute Q. de et al. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 573-583, 2012.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FERREIRA, Luiz Fernando Dias et al. Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented grape pomace. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 855-862, 2012.

GALDINO, Plúvia O. et al. Cinética de secagem de polpa de atemoia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 672-677, 2016.

GILAGO, Mulatu C.; CHANDRAMOHAN, V. P. Performance evaluation of natural and forced convection indirect type solar dryers during drying ivy gourd: An experimental study. **Renewable Energy**, v. 182, p. 934-945, 2022.

HASHEM, Eslam Ahmed et al. Review on the Air Temperature and Humidity Produce by Solar Dryer and Potential to be Reused. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 125, n. 1, p. 57-74, 2024.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

JESUS, Sandra Cerqueira de et al. Avaliação de banana-passa obtida de frutos de diferentes genótipos de bananeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 573-579, 2005.

KALETA, Agnieszka; GÓRNICKI, Krzysztof. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International journal of food science & technology**, v. 45, n. 5, p. 891-898, 2010.

KEMP, Ian C. Developments in scale-up procedures for industrial dryers. **Drying Technology**, v. 42, n. 13, p. 1964-1985, 2024.

KHAN, Md Imran H. et al. Application of machine learning-based approach in food drying: Opportunities and challenges. **Drying Technology**, v. 40, n. 6, p. 1051-1067, 2022.

KHERRAFI, Mohammed Abdelbassit et al. Advancements in solar drying technologies: Design variations, hybrid systems, storage materials and numerical analysis: A review. **Solar Energy**, v. 270, p. 112383, 2024.

KÖPPEN, Wladimir. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. **Geographische Zeitschrift**, v. 6, n. 11. H, p. 593-611, 1900.

LAMIDI, Rasaq O. et al. Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review. **Applied energy**, v. 233, p. 367-385, 2019.

LI, Heping; RAMASWAMY, Hosahalli S. Influence of osmotic dehydration conditions and finish air drying on the adsorption isotherms of cylindrical apple slices. **Drying Technology**, p. 1-10, 2024.

LINGAYAT, Abhay; ZACHARIAH, Richu; MODI, Anish. Current status and prospect of integrating solar air heating systems for drying in various sectors and industries. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102274, 2022.

LIU, Xinyan et al. Recent Advances in the Mechanisms of Quality Degradation and Control Technologies for Peanut Butter: A Literature Review. **Foods**, v. 14, n. 1, p. 105, 2025.

LOZANO, R. D. “El color y su medición”, Ed. I Américalee S.R.L, Buenos Aires, 1978, 640 p.

MARTÍNEZ, Sidonia et al. Banana drying: a review on methods and advances. **Food Reviews International**, v. 40, n. 8, p. 2188-2226, 2024.

MATIAS GONÇALVES, Lindomar et al. Solar Drying of Sludge from a Steel-Wire-Drawing Industry. **Energies**, v. 16, n. 17, p. 6314, 2023.

MIDILLI, ADNAN; KUCUK, HAYDAR; YAPAR, Z. İ. Y. A. A new model for single-layer drying. **Drying technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MOHAMMED, Ssemwanga; FATUMAH, Nakiguli; SHADIA, Nasejje. Drying performance and economic analysis of novel hybrid passive-mode and active-mode solar dryers for drying fruits in East Africa. **Journal of Stored Products Research**, v. 88, p. 101634, 2020.

MOHANA, Y. et al. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. **Solar Energy**, v. 208, p. 321-344, 2020.

MOHANA, Y. et al. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. **Solar Energy**, v. 208, p. 321-344, 2020.

MUJUMDAR, Arun S. **Handbook of industrial drying**. CRC press, 2006.

MUJUMDAR, Arun S.; DEVAHASTIN, Sakamon. Fundamental principles of drying. **Exergex, Brossard, Canada**, v. 1, n. 1, p. 1-22, 2000.

NDUKWU, Macmanus Chinenye et al. A comparison of the drying kinetics, energy consumption and colour quality of drying medicinal leaves in direct-solar dryer with different colours of collector cover. **Renewable Energy**, v. 216, p. 119076, 2023.

NETLAK, Petcharat et al.  $\beta$ -Carotene and lutein accumulation, and carotenoid biosynthetic gene expression during fruit development and fruit ripening of A genome banana. **Scientia Horticulturae**, v. 307, p. 111484, 2023.

ONWUDE, Daniel I. et al. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 15, n. 3, p. 599-618, 2016.

PANDEY, Saurabh; KUMAR, Anil; SHARMA, Atul. Sustainable solar drying: Recent advances in materials, innovative designs, mathematical modeling, and energy storage solutions. **Energy**, p. 132725, 2024.

RAZAK, Amir Abdul et al. Recent advances in solar drying system: a review. **International Journal of Engineering Technology and Sciences**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2021.

RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, Juan et al. Solar drying of strawberry using polycarbonate with UV protection and polyethylene covers: Influence on anthocyanin and total phenolic content. **Solar Energy**, v. 221, p. 120-130, 2021.

SALEHI, Fakhreddin. Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: A review. **International Journal of Fruit Science**, v. 21, n. 1, p. 546-555, 2021.

SHEN, Chen et al. Drying kinetics and moisture migration mechanism of yam slices by cold plasma pretreatment combined with far-infrared drying. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, p. 103730, 2024.

SILVA, Michel Barros. Avaliação de um secador solar em diferentes condições climáticas e meteorológicas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e15411124405-e15411124405, 2022.

SOARES, Marcelo de Oliveira et al. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 267-278, 2021.

SONTAKKE, Megha S.; SALVE, Sanjay P. Solar drying technologies: A review. **International Journal of Engineering Science**, v. 4, n. 4, p. 29-35, 2015.

TAPIA, María S.; ALZAMORA, Stella M.; CHIRIFE, Jorge. Effects of water activity ( $a_w$ ) on microbial stability as a hurdle in food preservation. **Water activity in foods: Fundamentals and applications**, p. 323-355, 2020.

UEBERSAX, Mark A.; SIDDIQ, Muhammad. Processing of Dehydrated Banana Products. **Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Technology, and Nutrition**, p. 117-140, 2020.



VHANGANI, Lusani Norah; VAN WYK, Jessy. Heated plant extracts as natural inhibitors of enzymatic browning: A case of the Maillard reaction. **Journal of Food Biochemistry**, v. 45, n. 2, p. e13611, 2021.

ZHANG, Ze; ZHANG, Shuting. A new moisture control method: Analysis of dynamic changes of temperature and moisture in coal particles during drying. **Energy Reports**, v. 8, p. 4170-4181, 2022.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.