

Cinética de secagem das amêndoas de cupuaçu cultivadas na Amazônia Oriental

Drying kinetics of cupuaçu almonds cultivated in Eastern Amazon

Cinética de secado de las almendras de cupuazú cultivadas en la Amazonía Oriental

Recebido: 24/01/2024 | Revisado: 31/01/2024 | Aceitado: 01/02/2024 | Publicado: 03/02/2024

Douglas dos Santos Damasceno Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8142-1769>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: douglasd600.dd@gmail.com

Naeliton de Aquino Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5447-8179>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: gnaelitonaquino@gmail.com

Arlindo Modesto Antunes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8652-7249>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: arlindo007@gmail.com

Guilherme Mathias Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8174-6645>
Universidade Federal de Lavras, Brasil
E-mail: gmlopes25@gmail.com

Magnun Antonio Penariol Da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4375-5783>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: magnun.penariol@ufra.edu.br

Adriano Bicioni Pacheco

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-59917997>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: adriano.pacheco@ufra.edu.br

Resumo

No Brasil, o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) é uma das frutas tropicais mais importantes na região amazônica. O estado do Pará é o principal produtor da Região Norte, com produção de 29 mil toneladas. No entanto, as amêndoas de cupuaçu passam por várias etapas antes do armazenamento, sendo a secagem a mais importante. Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar a cinética de secagem, o teor de água inicial e final, a taxa de secagem, bem como ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais, para indicar a melhor temperatura em função do tempo de secagem em protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido forçado, submetidas às temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C. Para determinar a cinética de secagem, as amêndoas foram periodicamente pesadas até atingirem o equilíbrio para medir a perda de água. Com base nos dados experimentais de secagem, os valores da razão de umidade foram determinados e posteriormente aplicados a diferentes modelos matemáticos. As médias de teor de água inicial das amêndoas para ambas as temperaturas foram maiores que 50%, enquanto que nas médias finais para as temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C foram sequencialmente de 13,8%, 7,25% e 6,51%. As taxas de secagem foram de 3,1%, 3,4% e 3,8%, respectivamente. O modelo de Henderson e Pabis modificado apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. Todas as temperaturas foram eficientes em relação ao tempo de secagem. As amêndoas secas podem ser utilizadas na fabricação de alimentos.

Palavras-chave: *Theobroma grandiflorum*; Modelagem matemática; Teor de água.

Abstract

In Brazil, cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) is one of the most important tropical fruits in the Amazon region. The state of Pará is the main producer in the Northern Region, with a production of 29 thousand tons. However, cupuaçu seeds go through several stages before storage, with drying being the most crucial. Therefore, the objective of this study was to analyze the drying kinetics, initial and final moisture content, drying rate, as well as fit mathematical models to experimental data to indicate the optimal temperature as a function of drying time in a prototype of a vertical fixed-bed drying silo with forced induced air, subjected to temperatures of 55°C, 65°C, and 75°C. To determine the drying kinetics, the almonds were periodically weighed until reaching equilibrium to measure the water loss. Based on the experimental drying data, moisture ratio values were determined and subsequently applied to different mathematical models. The average initial moisture content of the seeds for all temperatures was greater than 50%, while the final averages for temperatures of 55°C, 65°C, and 75°C were sequentially 13.8%, 7.25%, and 6.51%. The drying rates were 3.1%, 3.4%, and 3.8%, respectively. The modified Henderson and Pabis model

provided the best fit to the experimental data. All temperatures were effective concerning the drying time. The dried almonds can be used in food manufacturing.

Keywords: *Theobroma grandiflorum*; Mathematical modeling; Water content.

Resumen

En Brasil, el cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) es una de las frutas tropicales más importantes en la región amazónica. El estado de Pará es el principal productor en la Región Norte, con una producción de 29 mil toneladas. Sin embargo, las almendras de cupuaçu atraviesan varias etapas antes del almacenamiento, siendo el secado la más importante. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar la cinética de secado, el contenido de agua inicial y final, la tasa de secado, así como ajustar modelos matemáticos a los datos experimentales, para indicar la mejor temperatura en función del tiempo de secado en un prototipo de silo secador vertical de lecho fijo con aire inducido forzado, sometido a temperaturas de 55°C, 65°C y 75°C. Para determinar la cinética de secado, las almendras fueron pesadas periódicamente hasta alcanzar el equilibrio para medir la pérdida de agua. Con base en los datos experimentales de secado, se determinaron los valores de la razón de humedad y posteriormente se aplicaron diferentes modelos matemáticos. Las medias del contenido de agua inicial de las almendras para ambas temperaturas fueron superiores al 50%, mientras que las medias finales para las temperaturas de 55°C, 65°C y 75°C fueron secuencialmente del 13,8%, 7,25% y 6,51%. Las tasas de secado fueron del 3,1%, 3,4% y 3,8%, respectivamente. El modelo modificado de Henderson y Pabis presentó la mejor adaptación a los datos experimentales. Todas las temperaturas fueron eficientes en relación con el tiempo de secado. Las almendras secas pueden utilizarse en la fabricación de alimentos.

Palabras clave: *Theobroma grandiflorum*; Modelado matemático; Contenido de agua.

1. Introdução

No Brasil, o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.), é uma das mais importantes frutas tropicais da região amazônica. O Pará é o principal estado produtor da Região Norte brasileira, com área plantada de 8.900 hectares e produção de 29 mil toneladas por ano (Santos Filho et al., 2020; IBGE, 2020).

O município de Tomé-Açu destaca-se como um dos principais polos produtores do fruto. Além de sua polpa altamente saborosa, e de excelente aroma, o emprego das amêndoas na elaboração de chocolate vem se destacando na agroindústria local (Conceição et al., 2019).

De acordo com Costa et al. (2022), o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) pertence ao mesmo gênero do cacau (*Theobroma cacao* L.). De suas amêndoas também pode-se produzir um elemento que se assemelha ao chocolate, devido a esta semelhança com o doce, ficou conhecido como “cupulate”.

Assim, igualmente como as amêndoas do cacau (*Theobroma cacao* L.), as amêndoas do cupuaçu passam por diversas etapas até a sua armazenagem. Entretanto, Araújo et al. (2022), diz que dentre essas etapas, a secagem se destaca como a mais importante, visto que reduz a quantidade de água das amêndoas tornando-as mais resistentes ao apodrecimento, aparecimento de fungos e bactérias, e evitando a germinação indesejada.

O processo de secagem é de fundamental importância, onde as sementes precisam ser submetidas a uma secagem ideal para manter um baixo teor de água de tal modo que possibilite preservar suas qualidades físico-químicas. Na escolha do método de secagem, é imprescindível a utilização de secagem artificial, cujo a operação está relacionada com volume, velocidade de secagem e temperatura do ar (Garcia et al., 2004).

A secagem de produtos vegetais pode ocorrer de forma natural ou artificial, esta última, se destaca com a secagem em um protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido forçado, que se caracteriza pela geração de calor por resistência elétrica. A utilização de resistência elétrica no silo secador propicia um maior controle da temperatura adequada durante a etapa de secagem (Araújo et al., 2022).

As relações semi-empíricas e empíricas têm demonstrado ser as escolhas mais eficazes na previsão do processo de secagem. Contudo, é importante ressaltar que a validade dessas relações está limitada às condições específicas nas quais os dados experimentais foram coletados (Brooker et al., 1992).

Com base nesse contexto, o presente experimento objetivou-se analisar a cinética de secagem, bem como o teor de

água inicial e final, a taxa de secagem, e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais, para indicar a melhor temperatura em função do tempo de secagem das amêndoas de cupuaçu em protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido forçado, submetidas às temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C. Ademais, o experimento é de grande importância, uma vez que as amêndoas secas podem ser utilizadas posteriormente na fabricação de produtos alimentícios, com um tempo de armazenamento maior e com as suas características nutricionais preservadas.

2. Metodologia

O presente experimento foi conduzido no Laboratório de Engenharia Rural da Universidade Federal Rural da Amazônia Campus de Tomé-Açu/PA. Com coordenadas geográficas de 02° 24' 15"S e 48° 09' 51"W (Araújo et al., 2022).

As sementes foram coletadas em uma cooperativa situada no município de Tomé-Açu, no mês de fevereiro do ano de 2023, fermentadas durante 5 dias sendo selecionadas as amêndoas intactas e sadias. A precipitação pluviométrica para a região é de 2.300 mm, com temperatura média anual de 26,4 °C e umidade relativa do ar média 85% anual (Pachêco et al., 2009).

O teor de água inicial e final da massa de amêndoas foi determinado utilizando-se o método padrão da estufa a 105 ± 1°C com três repetições, por 24 horas, realizado de acordo com as Regras Para Análise de Sementes (Brasil, 2009).

Baseando-se em metodologias existentes, o experimento foi conduzido arbitrando a temperatura de secagem em 55°C, 65°C e 75°C (Ullmann et al., 2010). Para secagem, um protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido forçado, com distribuição axial do ar de secagem composto por chapas de metal, material PVC, motor de 0,7355 kW, cuja vazão adotada foi de 12,2 m³/min e velocidade do ar de 26 m/s foi empregado ao experimento, conforme metodologia citada por (Furtado et al., 2020; Vaz Junior et al., 2019).

A cada temperatura, utilizaram-se três repetições com uma massa inicial de 400g de amêndoas adicionadas em redes plásticas microperfuradas de 1kg. O tempo de secagem total para todas as temperaturas foi de aproximadamente 910 minutos, equivalente a 15 horas.

Para a determinação da cinética de secagem, as massas de amêndoas foram pesadas periodicamente até atingirem o equilíbrio, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01g, isso para mensurar a perda de água presente nas amêndoas.

Na obtenção das curvas de secagem, avaliou-se a perda de água ao longo da secagem calculada por diferença de massa. Nesta fase, as redes plásticas com as amostras foram pesadas periodicamente, começando a pesagem de 5 em 5 minutos, depois de 10 em 10 minutos, de 15 em 15 minutos, posteriormente de 30 em 30 minutos e após 4 horas de secagem, aumentava-se o intervalo de pesagem para 1 em 1 hora, perfazendo a operação até atingir o teor de água de equilíbrio do produto, ou seja, até massa constante. Os dados coletados nesses intervalos foram dispostos em tabelas no *Software* Microsoft Excel® 2019.

Os diferentes modelos matemáticos na Tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais de secagem obtidos no experimento, utilizando o *Software* STATISTICA® 10.0. Os modelos de melhor ajuste foram escolhidos para representar o processo de secagem das amêndoas de cupuaçu (Amaral et al., 2018; Corrêa et al., 2010; Corrêa Filho et al., 2015; Melo et al., 2016).

Tabela 1 - Modelos matemáticos ajustados à cinética de secagem das amêndoas de cupuaçu.

Modelo	Designação do modelo	Equação
$RU = \exp(-k.t)$	Newton	(1)
$RU = a.\exp(-k.t)$	Henderson e Pabis	(2)
$RU = \exp(-k.t^n)$	Page	(3)
$RU = 1 + a.t + b.t^2$	Wang e Singh	(4)
$RU = \exp((-a-(a^2 + 4 b t)^{0.5})/2 b)$	Thompson	(5)
$RU = a + b.t + c.t^{1.5} + d.t^2$	Valcam	(6)
$RU = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$	Dois Termos	(7)
$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-k_0.t) + c.\exp(-k_1.t)$	Henderson e Pabis modificado	(8)
$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k_1.t)$	Verma	(9)

RU: razão de umidade do produto (adimensional); t: tempo de secagem (min); k, k₀, k₁: constantes de secagem; a, b e c: coeficientes dos modelos.
 Fonte: Corrêa et al. (2010); Melo et al. (2016).

Para o cálculo da razão de umidade (RU) durante as secagens nos diferentes tratamentos, utilizou-se a equação 10:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (10)$$

em que:

U - teor de água do produto, decimal b.s;

U_i - teor de água inicial do produto, decimal b.s;

U_e - teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

Os parâmetros utilizados para selecionar o melhor modelo foram: o coeficiente de determinação ajustado (R²), o erro médio relativo (P), o erro médio estimado (SE). Os valores de P e de SE foram estimados de acordo com as equações 11 e 12 (Alves et al., 2013; Amaral et al., 2018; Corrêa Filho et al., 2015).

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (11)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (12)$$

em que:

Y - valor observado experimentalmente;

Y₀ - valor calculado pelo modelo;

n - número de observações experimentais;

GLR - número de graus de liberdade do modelo.

A taxa de secagem (TX) da massa de amêndoas para as diferentes temperaturas foi determinada pela equação 13:

$$TX = \frac{(U_i - U_f)}{t} \quad (13)$$

em que:

U_i - teor de água inicial do produto, (% b.u.);

U_f - teor de água final do produto, (% b.u.);

t - tempo de secagem do produto, h.

Os experimentos de teor de água inicial e final, assim como a taxa de secagem, foram conduzidos seguindo um delineamento inteiramente casualizado (DIC) 3 x 3. Os dados obtidos foram submetidos a análise estatística utilizando a análise de variância e o teste de médias de Tukey, com nível de significância de 5%.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta as comparações de médias de teor de água inicial e final juntamente com a taxa de secagem das amêndoas de cupuaçu obtidas com as temperaturas empregadas.

Tabela 2 - Comparação entre médias do teor de água inicial e final e taxa de secagem (TX) obtidos com diferentes temperaturas de secagem das amêndoas de cupuaçu.

Temperatura (°C)	Média do teor de água inicial b.u. (%)	Média do teor de água final b.u. (%)	Taxa de Secagem (%)
55	61,4 a	10,6 a	3,3 ab
65	58,8 b	7,25 bc	3,4 bc
75	64,0 c	6,51 c	3,8 c

* Médias seguida da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, ($P \leq 0,05$).
Fonte: Autores.

Comparando os resultados obtidos na Tabela 2, notou-se que houve diferença significativa entre médias de teor de água inicial para as temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C. A média de teor de água final para a temperatura de 55°C apresentou diferença estatística das demais temperaturas. A taxa de secagem das temperaturas de 55°C e 75°C indicou diferença estatística entre elas.

As médias de teor de água inicial das amêndoas de cupuaçu para todas as temperaturas foram maiores que 50%. Esse resultado está próximo aos valores obtidos por Medeiros e Eira (2006), os quais relatam que o teor de água de 50% é comum para sementes recalcitrantes, como o cupuaçu.

Observou-se que a média de teor de água final das amêndoas com secagem em temperatura de 55°C ficou em 10,6% b.u. diante do tempo de secagem adotado, o que as torna próprias para o armazenamento, sua taxa de secagem em função do tempo foi a menor com 3,3% por hora.

Entretanto, as temperaturas de 65°C e 75°C apresentaram desenvolvimento e eficiência de secagem com médias de teor de água final de 7,25% e 6,51% em base úmida e taxa de secagem de 3,4% e 3,8% por hora respectivamente, onde a temperatura de 75°C obteve a maior taxa de secagem da massa de amêndoas e por sua vez amêndoas mais secas.

Notou-se que a média do teor de água final para ambas as temperaturas se aproximou de $\pm 8\%$ b.u. No contexto do processo de beneficiamento, é aconselhável alcançar um teor de água de 8%, assegurando uma apresentação externa de alta qualidade e preservando o aroma natural. Essa porcentagem é considerada segura para prevenir o desenvolvimento de microrganismos nas amêndoas de cacau, sendo igualmente aplicável às amêndoas de cupuaçu devido à sua inclusão no mesmo gênero (Martins et al., 2011; Costa et al., 2022).

Na Tabela 3, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação, erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) para o modelo de Henderson e Pabis modificado (Equação 8) em que melhor se ajustou ao processo de secagem das amêndoas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum Schum*) nas temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C.

Tabela 3 - Coeficientes de determinação (R², %), erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE) do modelo de Henderson e Pabis modificado, ajustado à curva de secagem das amêndoas de cupuaçu.

Temperatura (°C)	Equação	Parâmetros Estatístico		
		R ²	P	SE
55	8	99,81%	0,04%	0,09%
65	8	99,30%	0,02%	0,12%
75	8	98,88%	0,02%	0,13%

Fonte: Autores.

Na Tabela 3 observou-se que nas três temperaturas utilizadas de secagem das amêndoas de cupuaçu, o modelo de Henderson e Pabis modificado exibe valores satisfatórios dos erros médios relativos e estimados, bem como um alto coeficiente de determinação (R²). Valores de erro relativo médio abaixo de 10% significam um bom ajuste de dados para o fenômeno de secagem de acordo com (Madamba; Driscoll; Buckle, 1996) e confirmado por (Mohapatra; Rao, 2005). Segundo Draper e Smith (1998), para a estatística o erro médio estimado (SE), são considerados ideais valores próximos a zero. Os coeficientes das constantes destes modelos ajustados aos dados experimentais, nas temperaturas de secagem utilizadas, estão apresentados na Tabela 4.

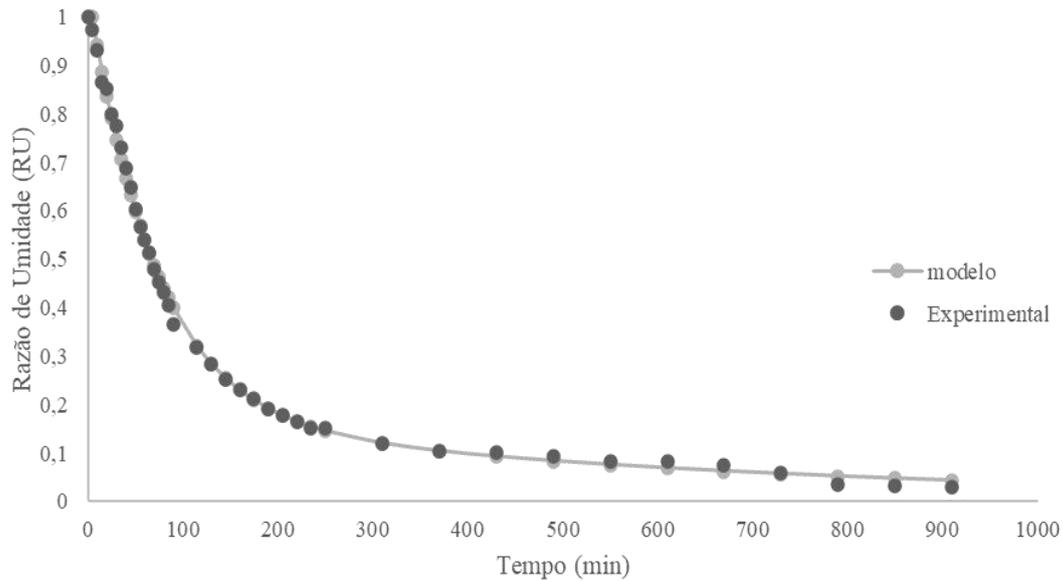
Tabela 4 - Coeficiente das constantes do modelo de Henderson e Pabis modificado ajustados à curva de secagem das amêndoas de cupuaçu.

Temperatura (°C)	modelo	Coeficientes					
		a	b	c	k	k ₀	k ₁
55	8	0,88	0,13	0,17	1,42	119,52	0,00
65	8	0,16	0,16	0,71	0,27	0,00	0,02
75	8	0,61	8,49	8,92	0,24	0,01	0,01

Fonte: Autores.

O cálculo da razão de umidade (RU) durante as secagens nas diferentes temperaturas de acordo com o tempo foi realizado através da Equação 10. A Figura 1 demonstra a comparação dos valores simulados do modelo e os valores experimentais à variação da razão de umidade (RU), esses dados são postos em função do tempo conforme descrito pelo modelo de Henderson e Pabis modificado, em que melhor se ajustou aos dados experimentais da temperatura de 55°C.

Figura 1 - Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Henderson e Pabis modificado e experimentais de amêndoas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum Schum*), submetidos a temperatura de 55°C.



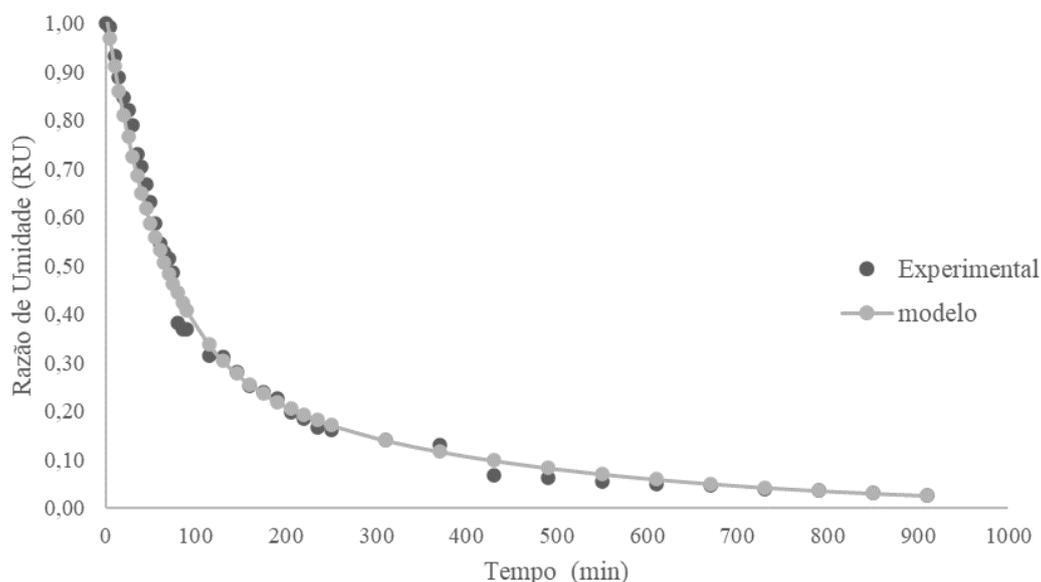
Fonte: Autores.

A curva de secagem do modelo de Henderson e Pabis modificado na temperatura de 55°C (Figura 1) apresenta um sequenciamento de pontos alinhados, ou seja, menos dispersos da curva de secagem experimental. Valores de razão de umidade em função do tempo apresentam variações, onde pode-se destacar uma dispersão no sequenciamento de pontos para essa temperatura próximo a 100 minutos de secagem, contudo, apresenta diminuição de razão de umidade pelo tempo, onde aproxima-se do teor de umidade recomendado.

A massa de amêndoas perde água mais rapidamente no início da secagem do que no final, corroborando com o estudo da simulação de secagem de milho de Oliveira et al. (2020), onde o mesmo constatou que logo no início do processo de secagem a massa de grãos seca mais rapidamente, tendendo a se estabilizar depois de um certo tempo. A cinética de secagem de produtos vegetais fornece informações que permitem mensurar o tempo de secagem em secadores, onde permite calcular a quantidade de água que a massa de amêndoas produz.

A Figura 2 demonstra as curvas de secagem do modelo de Henderson e Pabis modificado quanto do experimental para a temperatura de 65°C.

Figura 2 - Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Henderson e Pabis modificado e experimentais de amêndoas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum Schum*), submetidos a temperatura de 65°C.



Fonte: Autores.

Na Figura 2, é possível notar uma discreta dispersão de pontos aos 100 minutos de secagem e próximo aos 450 minutos. No entanto, ao longo praticamente de todo o processo de secagem, ocorre uma sequência coordenada e paralela de pontos, sugerindo que o modelo se ajusta de maneira precisa ao experimento. Esse comportamento possibilita a sobreposição praticamente completa das curvas.

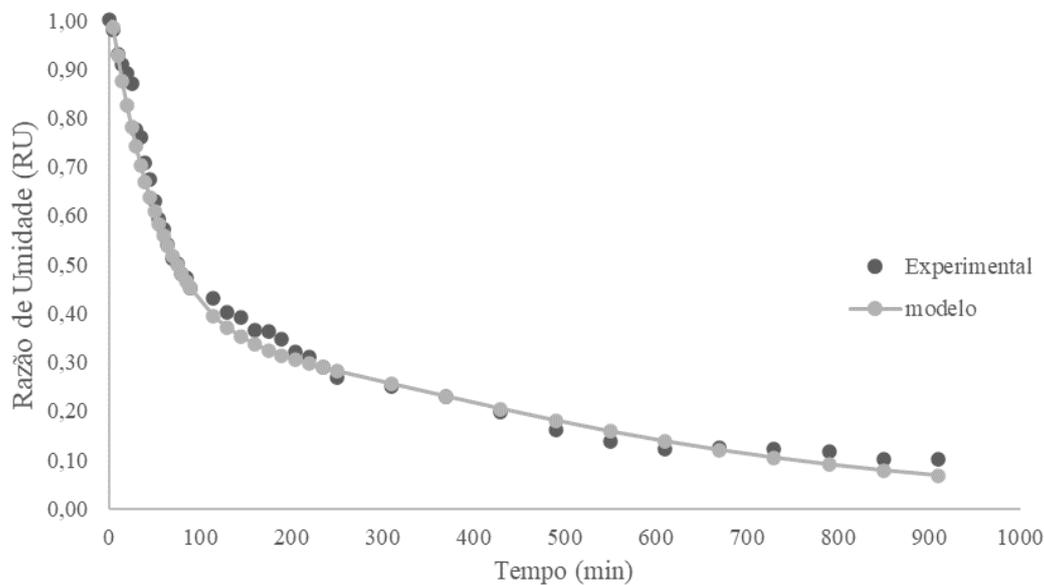
Além disso, quando se aumenta o intervalo de secagem, a razão de umidade na massa de amêndoa tende a se estabilizar, ocorrendo a diminuição da taxa de secagem. Nesse contexto, Araújo et al. (2017) estudou a cinética de secagem de acerola em leito de espuma, onde foi possível perceber que a diferença nas curvas de secagem foi em função das diferentes temperaturas, onde adquirem uma maior inclinação à medida que a temperatura do ar de secagem aumenta, dado a adição de calor transferido do ar de aquecimento para o produto, o que representa uma maior transferência de calor e massa e, conseqüentemente, menores tempos de secagem.

Considerando as curvas de secagem, à medida que a temperatura é aumentada, ocorre maior remoção de água das amêndoas, além da redução do tempo de secagem, permitindo que as amêndoas cheguem ao teor de água de equilíbrio mais rápido. Esse mesmo comportamento foi constatado por Goneli et al. (2009) no processo de secagem de café, que ressalta que a elevação da temperatura na secagem, faz as moléculas de água atingirem grandes níveis de energia, aumentando suas vibrações e as tornando menos instáveis, ocorrendo a quebra da ligação entre a água e os campos de sorção, resultando na redução de teor de água, portanto, o mecanismo que regula o movimento de umidade interna das amêndoas é a difusão.

O aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente na resistência da água ao escoamento, logo, a diminuição da viscosidade facilita a difusão das moléculas de água no interior do produto no processo de secagem (Corrêa et al., 2010).

Na Figura 3, são apresentados os valores do modelo de Henderson e Pabis modificado quanto do experimental da secagem com a temperatura de 75°C.

Figura 3 - Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Henderson e Pabis modificado e experimentais de amêndoas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum Schum*), submetidos a temperatura de 75°C.



Fonte: Autores.

Observou-se uma dispersão de pontos no intervalo de 100 a 200 minutos de secagem, assim como no final do processo, evidenciando consistência com o valor do coeficiente de determinação (R^2 , %) apresentado na Tabela 3 para a temperatura de 75°C, que registrou 98,88%, sendo a menor entre todas as temperaturas estudadas. Apesar disso, os coeficientes de determinação (R^2) superiores a 90%, conforme detalhado na Tabela 3, indicam, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), uma representação satisfatória do processo de secagem, resultando no alcance do teor de água desejado no tempo de secagem aplicado.

O modelo de Henderson e Pabis modificado foi o que melhor se ajustou no processo de secagem das amêndoas de cupuaçu em todas as temperaturas empregadas. Corroborando com isto, resultados semelhantes foram encontrados por Corrêa et al. (2007) quando estudou a modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em camadas delgadas reguladas em temperaturas de 35°C, 45°C e 55°C e por Moraes et al. (2013) no estudo da modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*). Os autores concluíram que entre todos os modelos utilizados, o modelo de Henderson e Pabis modificado apresentou um melhor ajuste aos dados experimentais da cinética de secagem.

A cinética de secagem das amêndoas de cupuaçu para ambas as temperaturas demonstrou que, todas as temperaturas empregadas secam a massa de amêndoas corretamente até atingir o teor de água ideal de $\pm 8\%$ b.u., onde ainda, apresentaram melhores resultados de retirada de água livre, o que resultou em amêndoas visivelmente mais secas e que apresentaram uma melhor representação gráfica do processo.

Observou-se ainda, que para todas as temperaturas o comportamento da taxa de secagem em função da razão de umidade da massa de amêndoas, evidencia que a secagem está sendo processada a um período de taxa decrescente.

A cinética de secagem apresentou uma diminuição gradativa do teor de água com o tempo, até se tornar constante. Além disso, observou-se que, mesmo para diferentes temperaturas aplicadas, a secagem das amêndoas apresentou comportamento semelhante. Observou-se também que o tempo necessário para alcançar o teor de água ideal de $\pm 8\%$ b.u na secagem das amêndoas de cupuaçu em protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido forçado em temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C são de ± 910 minutos (equivalente a 15 horas).

4. Conclusão

As médias de teor de água inicial das amêndoas de cupuaçu para todas as temperaturas foram maiores que 50%, enquanto que nas médias finais teve-se porcentagem de 10,6%, 7,25% e 6,51% respectivamente para as temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C, ficando próximas a porcentagem ideal para armazenamento. A taxa de secagem foi de 3,3%, 3,4% e 3,8%, sequencialmente, aumentando proporcionalmente com o aumento da temperatura.

O modelo de Henderson e Pabis modificado foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética de secagem das amêndoas de cupuaçu, nas condições de secagem empregadas.

Todas as temperaturas foram eficientes em relação ao tempo de secagem das amêndoas de cupuaçu em protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido forçado.

Esses resultados ressaltam o potencial dos estudos sobre as amêndoas de cupuaçu, especialmente no que diz respeito à otimização dos processos de secagem. Compreender as características cinéticas e os melhores modelos de ajuste ajuda a definir as condições ideais para a secagem, resultando em um produto de maior qualidade. Além disso, os estudos sobre a influência da temperatura na taxa de secagem fornecem informações importantes para o desenvolvimento de tecnologias e estratégias que possam melhorar a eficiência e o desempenho dos processos de secagem de produtos amazônicos, assim como as amêndoas de cupuaçu.

Referências

- Alves, G. E., Isquierdo, E. P., Borém, F. M., Siqueira, V. C., Oliveira, P. D., & Andrade, E. T. (2013). Drying kinetics of natural coffee for different temperatures and low relative humidity. *Coffee Science*, 8(2), 238-247.
- Amaral, R., Andrade, E. T., Gomes, F. C., Borém, F. M., Lemos, I., & Dias, C. A. (2018). Simulation of coffee fruit drying using computational fluid dynamics. *Coffee Science*, 13(4), 477-488. <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1489>
- Araújo, C. da S., Macedo, L. L., Vimercati, W. C., Saraiva, S. H., Oliveira, A. do N., & Teixeira, L. J. Q. (2017). Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. *Brazilian Journal of Food Technology*, 20, e2016152. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.15216>
- Araújo, M. K. da C. de, Silva, R. R. de C., Silva, M. A. P. da, & Antunes, A. M. (2022). Cocoa almonds (*Theobroma cacao* L.) submitted to different temperatures and drying times in northern Brazil. *Brazilian Journal of Development*, 8(12), 77409-77421. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n12-044>
- Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Departamento Nacional de Defesa Vegetal. Coordenação de Laboratório Vegetal. (2009). *Regras para Análise de Sementes*. Brasília: MAPA – SDA CGAL.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F. W.; & Hall, C.W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company.
- Conceição, R. C. da, Guimarães, R. dos S., Pinto, D. B., Silva, E. R. da, & Araújo, M. L. V. de. (2019). Aspectos da produção do cupuaçu no município de Tomé-Açu, Pará. In: A produção do conhecimento nas ciências agrárias e ambientais. *Revista Atena Editora*, 75-80. <https://doi.org/10.22533/at.ed.84519260410>
- Corrêa, P. C., Oliveira, G. H. H., Botelho, F. M., & Goneli, A. L. D. (2010). Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. *Revista Ceres*, 57(5), 595-601. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500005>
- Corrêa, P. C., Resende, O., Martinazzo, A. P., Goneli, A. L. D., & Botelho, F. M. (2007). Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, 27(2), 501-510. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000300020>
- Corrêa Filho, L. C., Andrade, E. T. de, Martinazzo, A. P., D'Andrea, E. M., Sousa, F. A. de, & Figueira, V. G. (2015). Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(8), 797-802. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p797-802>
- Costa, C. M. da, Silva, K. A. da, Santos, I. L., & Yamaguchi, K. K. de L. (2022). Integral use of cupuassu in baking. *Research, Society and Development*, 11(5), e34711528176. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28176>
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Furtado, W. V. S., Vaz Júnior, O. A., Veras, A. A. O., Sá, P. H. C. G., & Antunes, A. M. (2020). Low-cost automation for artificial drying of cocoa beans: A case study in the Amazon. *Drying Technology*, 40(1), 42-49. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1767644>
- Garcia, D. C., Barros, A. C. S. A., Peske, S. T., & Menezes, N. L. (2004). A secagem de sementes. *Ciência Rural*, 34(2), 603-608. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200045>
- Goneli, A., Correa, P., Júnior, P., & Oliveira, G. (2009). Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Especial Café, 64-73.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2023). *Censo agropecuário 2020*. Produção de Cupuaçu no Pará. Pará: IBGE.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75-97. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3)

Martins, J. M., Santos, J. H. F., Silva, W. S., Silva, V. B., Arruda, J. A. P., Nascimento, J. A. R., & Ramos, A. A. (2011). *Melhoria da Qualidade de Cacau*. Ilhéus: CEPLAC/CENEX.

Medeiros, A. C. S., & Eira, M. T. S. (2006). Comportamento fisiológico, secagem e armazenamento de sementes florestais nativas. *Comunicado Técnico*, Colombo: Embrapa Florestas, n. 127.

Melo, P. C., Devilla, I. A., Caetano, J. M., Silva, X. R. V. B., Antunes, A. M., & Santos, M. M. (2016). Modelagem matemática das curvas secas dos grãos de feijão carioca. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 11(3), 247-252. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119047705015>

Mohapatra, D., & Rao, P. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 66, 513-518. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023>

Morais, S. J. da S., Devilla, I. A., Ferreira, D. A., & Teixeira, I. R.. (2013). Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*). *Revista Ciência Agronômica*, 44(3), 455-463. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000300006>

Pachêco, N. A., Bastos, T. X., & Creão, L. G. C. (2009). Boletim agrometeorológico de 2008 para Tomé-Açu, PA. *Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental*, p. 36 (Documentos, 361).

Oliveira, W., & Martins, J. (2020). Simulação de secagem de milho em camada estacionária por meio de modelagem computacional. *Brazilian Journal of Development*, 6, 56128-56154. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-141>

Santos Filho, A. F., & Toro, M. J. U. (2020). Estudo bioquímico da fermentação do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* schum). *Cientific@ Multidisciplinary Journal*, 8(2), 1-24. <https://doi.org/10.29247/2358-260X.2020v7i2.4561>

Ullmann, R., Resende, O., Sales, J. de F., & Chaves, T. H. (2010). Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. *Revista Ciência Agronômica*, 41(3), 442-447. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000300017>

Vaz Junior, O. A., Antunes, A. M., Duarte, G. M., & Silva, M. A. P. (2019). Dimensionamento, desenvolvimento e análise de um protótipo para secagem de grãos e amêndoas na Amazônia Oriental. *Energia na Agricultura*, 34(2), 195-208. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2019v34n2p195-208>