

Cinética de secagem das amêndoas de cacau nativo das ilhas de várzea de Mocajuba, baixo Tocantins, Pará

Drying kinetics of native cocoa almonds from the floodplains of Mocajuba islands, lower Tocantins, Pará

Cinética de secado de almendras de cacao nativo de las islas de várzea de Mocajuba, bajo Tocantins, Pará

Recebido: 24/08/2023 | Revisado: 04/09/2023 | Aceitado: 05/09/2023 | Publicado: 07/09/2023

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

Elia Wedja Renata Corrêa Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2373-0267>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: eliaarenatacorrea@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

Maria do Perpétuo Socorro Progene Vilhena

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5493-695X>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: sprogene@ufra.edu.br

Maria José de Sousa Trindade

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9686-2710>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: trindademjs@yahoo.com.br

Arlindo Modesto Antunes

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

Resumo

O cacau (*Theobroma cacao* L.), possui relevância no mercado comercial e na indústria de produção de chocolate. No Brasil, o cacauzeiro é amplamente cultivado na região Norte, com destaque para o estado do Pará, onde o cacau das ilhas de várzea do Baixo Tocantins é influenciado por fatores naturais e práticas tradicionais de cultivo. Para obter subprodutos do cacau, são realizados alguns procedimentos. A etapa de secagem é crucial nesse processo para garantir a estabilidade do alimento, reduzindo o teor de água, ela pode ser realizada naturalmente em terreiros suspensos ou artificialmente em um secador vertical com ar induzido forçado. O presente estudo objetivou-se analisar a cinética de diferentes tipos de secagem de amêndoas de cacau nativo das ilhas de várzea do Baixo Tocantins, submetendo-as a tratamentos específicos, incluindo silo secador com ar aquecido a 60°C (T1), silo secador sem ar aquecido (T2) e secagem em terreiro suspenso (T3), bem como ajustar diferentes modelos matemáticos nos processos. Os modelos de Henderson e Pabis, Valcam e Page proporcionaram os melhores ajustes aos dados experimentais dos tratamentos T1 (silo secador com ar aquecido a 60°C), T2 (silo secador sem ar aquecido) e T3 (terreiro suspenso), respectivamente. As taxas de secagem foram de 3,9%, 1,9% e 3,9% para os tratamentos T1, T2 e T3, sequencialmente, indicando a influência do tempo de secagem e temperatura na taxa de secagem das amêndoas. Esses achados ajudam a entender a secagem das amêndoas de cacau, melhorando seu aproveitamento na produção de subprodutos de qualidade, como o chocolate.

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

Abstract

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) holds significance in the commercial market and the chocolate production industry. In Brazil, cocoa trees are extensively cultivated in the Northern region, with emphasis on the state of Pará, where cocoa from the floodplain islands of Lower Tocantins is influenced by natural factors and traditional cultivation practices. To obtain cocoa by-products, certain procedures are conducted. The drying stage is crucial in this process to ensure food stability by reducing water content. Drying can occur naturally on raised platforms or artificially in a vertical dryer with induced forced air. The present study aimed to analyze the kinetics of different types of drying of native cocoa almonds from the floodplain islands of Lower Tocantins. The almonds were subjected to specific treatments, including a dryer silo with heated air at 60°C (T1), a dryer silo without heated air (T2), and drying on raised platforms (T3). Additionally, different mathematical models were fitted to the processes. The Henderson and Pabis, Valcam, and Page models provided the best fits for the experimental data of treatments T1 (dryer silo with heated air at 60°C), T2 (dryer silo without heated air), and T3 (raised platforms), respectively. The drying rates were 3.9%, 1.9%, and 3.9% for treatments T1, T2, and T3, respectively, indicating the influence of drying time and temperature on almond drying rate. These findings help comprehend the cocoa almond drying process, enhancing their utilization in the production of quality by-products such as chocolate.

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

Resumen

El cacao (*Theobroma cacao* L.) tiene relevancia en el mercado comercial y en la industria de la producción de chocolate. En Brasil, el cacaotero se cultiva ampliamente en la región Norte, con énfasis en el estado de Pará, donde el cacao de las islas de várzea del Bajo Tocantins se ve influenciado por factores naturales y prácticas tradicionales de cultivo. Para obtener subproductos del cacao, se realizan ciertos procedimientos. La etapa de secado es crucial en este proceso para garantizar la estabilidad del alimento, reduciendo el contenido de agua; puede llevarse a cabo de manera natural en plataformas elevadas o artificialmente en un secador vertical con aire forzado inducido. El presente estudio tuvo como objetivo analizar la cinética de diferentes tipos de secado de almendras de cacao nativo de las islas de várzea del Bajo Tocantins, sometiéndolas a tratamientos específicos, incluyendo un silo secador con aire calentado a 60°C (T1), un silo secador sin aire calentado (T2) y secado en plataformas elevadas (T3), además de ajustar diferentes modelos matemáticos en los procesos. Los modelos de Henderson y Pabis, Valcam y Page proporcionaron los mejores ajustes para los datos experimentales de los tratamientos T1 (silo secador con aire calentado a 60°C), T2 (silo secador sin aire calentado) y T3 (plataformas elevadas), respectivamente. Las tasas de secado fueron del 3,9%, 1,9% y 3,9% para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente, lo que indica la influencia del tiempo de secado y la temperatura en la tasa de secado de las almendras. Estos hallazgos contribuyen a comprender el proceso de secado de las almendras de cacao, mejorando su utilización en la producción de subproductos de calidad, como el chocolate.

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

1. Introdução

O *Theobroma cacao* L., conhecido como cacau, é uma planta da família Malvaceae, apresenta uma relevância global significativa tanto no mercado comercial quanto na indústria de produção de chocolate. O cacaueiro é uma das espécies perenes amplamente cultivadas na região norte do Brasil, com destaque na região do estado do Pará (Araujo et al. 2018, 2022).

O cacau das ilhas de várzea de Mocajuba, no estado do Pará, possui características organolépticas superiores, devido a fertilidade do solo, clima equatorial, biodiversidade e práticas tradicionais de cultivo (Silva, 2001). Sua autenticidade e riqueza sensorial o tornam um tesouro gastronômico apreciado por amantes de chocolate, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico local com extrativismo de culturas nativas.

Para obter subprodutos derivados do cacau, é importante os procedimentos de pós-colheita, como fermentação, secagem e armazenamento. Nesse contexto, o conhecimento acerca da estrutura, composição e propriedades físicas dos produtos agrícolas incluindo as amêndoas de cacau e seus derivados, é de relevância crucial para a investigação sobre técnicas de secagem e armazenamento (Corrêa et al., 2008; Araujo et al., 2022).

A secagem é o processo mais importante para preservar as amêndoas, crucial na pós-colheita do cacau. A remoção da umidade evita o crescimento e a reprodução de microorganismos causadores da deterioração e minimiza muitas das reações de deterioração medidas pela umidade. Proporciona redução de peso e volume, minimiza os custos de embalagem, armazenamento e transporte e permite estocagem do produto em temperatura ambiente (Akpinar et al., 2003).

A redução do teor de água envolve processos simultâneos de transferência de calor e massa, os quais podem impactar

a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem. Se conduzida inadequadamente, a secagem pode afetar negativamente a qualidade do produto, especialmente devido às condições de temperatura e umidade relativa do ar (Costa et al., 2012; Resende et al., 2012).

A secagem pode ocorrer naturalmente, utilizando um terreiro suspenso, adotado por pequenos agricultores na região amazônica, com reviramento das amêndoas para uniformizar a secagem. No entanto, esse método é dispendioso, demanda muito tempo e espaço, além de depender das condições climáticas para remover a umidade dos grãos. Por outro lado, a secagem artificial utiliza um protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido forçado, onde controla a circulação do ar e a temperatura para realizar a secagem do produto (Garcia et al., 2004; Sales et al., 2016; Araujo et al., 2022).

No beneficiamento o teor de água adequado para as amêndoas do cacau é de 7 a 8%, com boa apresentação externa e aroma natural (Martins et al., 2011). De acordo com Costa et al. (2015), é possível alcançar o teor de água ideal para as sementes de cacau utilizando curvas de secagem. Essas curvas têm uma contribuição valiosa, não somente auxiliando nos processos pós-colheita e no desenvolvimento de equipamentos, mas também fornecendo dados cruciais sobre o tempo de secagem e o consumo energético relacionado.

As curvas de secagem variam de acordo com fatores como espécie, variedade, condições ambientais e métodos de preparo pós-colheita. Diversos modelos matemáticos têm sido empregados para descrever esse processo em produtos agrícolas, porém, as relações semi-empíricas e empíricas têm se mostrado mais eficazes para prever a secagem de grãos e sementes (Brooker et al., 1992).

Segundo Resende et al. (2010), esses modelos são tipicamente afetados por variáveis externas ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar durante a secagem. No entanto, eles não oferecem informações sobre os fenômenos de transporte de energia e água no interior dos grãos, e assumem que todo o processo de secagem ocorre apenas durante o período de taxa decrescente.

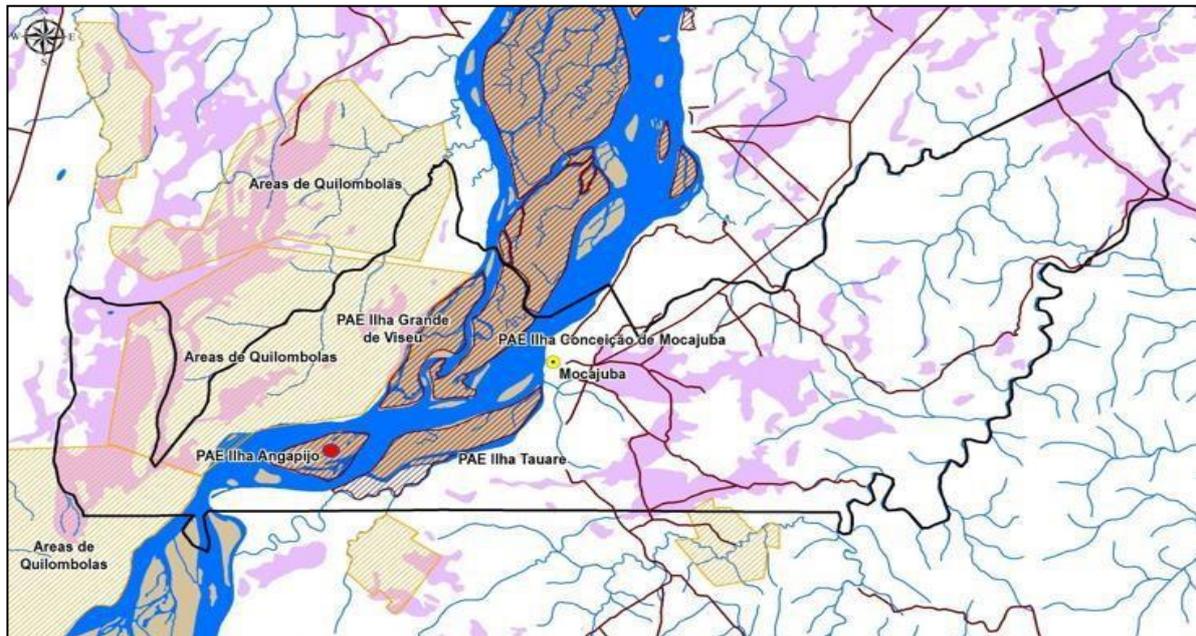
O experimento se objetivou analisar a cinética de diferentes tipos de secagens de amêndoas de cacau nativo das ilhas de várzea de Mocajuba no baixo Tocantins, utilizando um terreiro suspenso e um protótipo de silo secador vertical de leito fixo. Diferentes modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais para representar o fenômeno. A relevância do estudo está em contribuir para a compreensão da secagem das amêndoas de cacau, que poderão ser utilizadas posteriormente na fabricação de subprodutos de alta qualidade como o chocolate.

2. Metodologia

Área de estudo

O cacau utilizado na pesquisa foi colhido na ilha Angapijó (Figura 1), que está localizada em área de várzea do município de Mocajuba-PA, latitude 2° 37' 58.130 Sul e longitude 49° 36' 49.747 Oeste. O cacau nativo cresce ao longo do rio Tocantins e seus afluentes, nessas áreas há formação das florestas de várzeas, é uma das melhores alternativas agrícolas sustentáveis para a região.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Mosaico imagem LANDSAT RSG4B3 (2023).

Amostragem

As sementes *in natura* foram transportadas até o local da realização da secagem, no Laboratório de Engenharia Rural da Universidade Federal Rural da Amazônia Campus cidade de Tomé-Açu-PA, com as coordenadas geográficas latitude 02° 24 '15, Sul e longitude 48° 09' 51 Oeste. As amostras não foram submetidas a fermentação nem outro pré-tratamento.

A região de Tomé-Açu possui um clima mesotérmico e úmido, caracterizado pelo tipo Ami, conforme a classificação de Köppen. A temperatura média anual na região é de 26°C, e a umidade relativa do ar é em torno de 85%, condições ideais para o processo de secagem (PACHÊCO et al., 2009).

As amostras foram divididas nos tratamentos: secagem em protótipo de silo secador com ar aquecido á 60°C, denominado tratamento 1 (T1); Secagem em protótipo de silo secador sem ar aquecido, denominado tratamento 2 (T2) e secagem em terreiro suspenso à pleno sol denominado tratamento 3 (T3).

Teor de água inicial

A determinação do teor de água inicial das sementes *in natura* foi realizada no laboratório de química da Universidade Federal Rural da Amazônia, campus Tomé-Açu, seguindo a metodologia descrita por Brasil (2009). O método de estufa à 105 ± 3 °C exige a utilização de sementes inteiras. Desse modo, as amostras foram dispostas em 4 recipientes de alumínio, cada um contendo 5 sementes, e após pesagem, submetidas à secagem em estufa à temperatura de 105 ± 3 °C por 24 horas.

O cálculo da porcentagem de teor de água foi realizado aplicando-se a seguinte da equação 1:

$$T.A = \frac{100 \times (P - p)}{P} \quad (1)$$

Onde:

P - Peso Inicial, em gramas g;

p - Peso Final, em gramas g;

T.A - Teor de água, %.

Em seguida foi definida uma porcentagem média com os resultados para cada uma das quatro repetições.

Secagem em protótipo de silo secador com ar aquecido a 60°C (T1)

A amostra de amêndoas, inicialmente com massa de 600g, adicionadas em redes plásticas microperfuradas de 1kg, foi submetida a um processo de secagem em um protótipo de silo secador vertical de leito fixo (Figura 2). No referido sistema, o ar de secagem foi forçadamente induzido e distribuído axialmente por meio de chapas de metal e material PVC.

No experimento, foi empregado um motor centrífugo trifásico com 1,5 CV, 0,7355 kW, com uma vazão de 12,2 m³/min e uma velocidade do ar de 26 m/s. Para o aquecimento do ar de secagem, três resistências aletadas (tipo U) foram acopladas em paralelo, totalizando 3,9 kW de potência. A temperatura do dispositivo foi controlada com o auxílio de um termostato da marca TIW do Brasil, com faixa de controle de 10°C a 120°C, adotando para o tratamento 1 (T1) a temperatura de 60°C (Vaz Junior et al., 2019; Furtado et al., 2020).

Figura 2 - Protótipo de silo secador com ar aquecido.



Fonte: Autores.

Secagem em protótipo de silo secador sem ar aquecido (T2)

A massa inicial das amêndoas foi medida em 600g onde foram adicionadas em redes plásticas microperfuradas de 1kg e, em seguida, foram submetidas à secagem no protótipo de silo secador vertical de leito fixo com ar induzido, utilizando apenas ar não aquecido (Figura 3). Conseqüentemente, não houve emprego de aquecimento para o ar de secagem, ficando a temperatura de secagem determinada pelo ambiente.

Figura 3 - Protótipo de silo secador sem ar aquecido.



Fonte: Autores.

Para sustentação da massa de produto, uma tela de arame foi inserida no plênun do silo (Figura 4), permitindo o perfeito fluxo de ar na parte interna do secador.

Figura 4 - Amêndoas durante a secagem artificial.



Fonte: Autores.

A secagem das amostras ocorreu ao longo de um período de 38 horas e 13 horas contínuas para a secagem em silo secador com ar aquecido á 60°C (T1) e sem ar aquecido (T2) respectivamente, até a secagem e a massa de amêndoas se tornasse constante. As amostras foram pesadas a cada hora, seguindo um padrão estabelecido.

O teor de água foi calculado a cada hora de secagem, com o uso da mesma equação para teor de água inicial das amêndoas (equação 1). O peso inicial correspondeu à massa registrada a cada hora, enquanto o peso final foi obtido através da medição da massa seca após secagem em estufa a 105°C por 24 horas.

Secagem em terreiro suspenso (T3)

A estrutura utilizada para este método de secagem consiste em um terreiro suspenso utilizando para o processo de secagem a radiação solar e o vento. O terreiro foi construído utilizando como base de madeira e superfície de sombrite 50% (Figura 5).

Suas dimensões são de 0,8m de altura, 2m de comprimento e 1m de largura. O espaço para acomodação das amêndoas é dividido em quatro partes. Para este método foram usados 600g de amêndoas, pesadas de hora em hora, perfazendo a operação até atingir o teor de água de equilíbrio do produto, ou seja, até massa constante. Para as determinações utilizou-se balança analítica com precisão de 0,01g.

Figura 5 - Secagem das amêndoas em terreiro suspenso a 47°C.



Fonte: Autores.

Ademais, essa estrutura favorece a ventilação entre as amêndoas durante a secagem, prevenindo a fermentação, o crescimento de fungos e a formação de orvalho, além de proteger as amêndoas contra o contato direto com o solo e contaminação biológica, resultando em uma qualidade superior do produto final. (Santos et al., 2017).

A seleção adequada do local de instalação é crucial para o terreiro suspenso. Neste experimento, optou-se por posicioná-lo no sentido Leste-Oeste, visando maior captura de raio solar (Rehagro, 2022). Durante a secagem foi constatada com o auxílio de um termômetro a temperatura máxima de 47°C (Figura 5), sendo efetivo o posicionamento do terreiro para captação de alta radiação solar e por consequente, altas temperaturas.

Os diferentes modelos matemáticos na Tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais de secagem obtidos no experimento, utilizando o programa computacional STATISTICA® (versão 10.0) (Amaral et al., 2018; Corrêa et al., 2010; Filho et al., 2015; Melo et al., 2016).

Tabela 1 - Modelos matemáticos ajustados à cinética de secagem de amêndoas de cacau nativo das ilhas de várzea do baixo Tocantins.

Modelo	Designação do modelo	Eq. (14)
$RU = \exp(-k.t)$	Newton	(3)
$RU = a.\exp(-k.t)$	Henderson e Pabis	(4)
$RU = \exp(-k.t^n)$	Page	(5)
$RU = 1 + a.t + b.t^2$	Wang e Singh	(6)
$RU = \exp((-a-(a^2 + 4 b t)^{0.5})/2 b)$	Thompson	(7)
$RU = a + b.t + c.t^{1.5} + d.t^2$	Valcam	(8)
$RU = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$	Dois Termos	(9)
$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-k_0.t) + c.\exp(-k_1.t)$	Henderson e Pabis modificado	(10)
$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k_1.t)$	Verma	(10)

RU: razão de umidade do produto (adimensional); t: tempo de secagem (min); k, k₀, k₁: constantes de secagem, h⁻¹, e a, b, c, d, n: 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 11:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (11)$$

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 12 e 13 (Alves et al., 2013; Amaral et al., 2018; Filho et al., 2015).

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (12)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (13)$$

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 14:

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

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

Tabela 2 - Comparação entre médias do teor de água inicial e final e taxa de secagem (TX) obtidos com diferentes tratamentos de secagem das amêndoas de cacau. Secagem em silo secador com ar aquecido a 60°C T1; Secagem em silo secador sem ar aquecido T2; Secagem em terreiro suspenso T3.

Tratamento	Média do teor de água inicial b.u. (%)	Média do teor de água final b.u. (%)	Taxa de Secagem (%)
T1	58,29 a	7,13 a	3,9 ac
T2	58,78 ab	7,83 ab	1,3 b
T3	59,72 abc	7,92 abc	3,9 c

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

Ao comparar os resultados obtidos com amêndoas de cacau, a partir da análise da Tabela 2, observa-se que não foram encontradas diferenças significativas entre as médias de teor de água inicial nos tratamentos T1, T2 e T3. Da mesma forma, a média de teor de água final nos tratamentos também não apresentou diferença estatisticamente significativa entre eles.

A taxa de secagem do tratamento T2 apresentou diferença estatisticamente significativa em relação aos demais. Essa disparidade ocorreu devido ao maior tempo necessário para secar a massa de amêndoas no tratamento T2, que utiliza o silo secador sem ar aquecido e não possui controle de temperatura ambiente. A taxa de secagem é uma métrica útil para avaliar a eficiência do processo de secagem e tem aplicação potencial na otimização e controle de procedimentos de secagem em diversas aplicações industriais e agrícolas.

Observa-se que as médias do teor de água inicial das amêndoas de cacau nativo das ilhas de várzea de Mocajuba, baixo Tocantins, para todos os tratamentos, excederam 50%. Esse resultado está em consonância com as constatações de Medeiros et al. (2006), os quais também relataram que um teor de água em torno de 50% é comum em sementes recalcitrantes, como as do cacau.

Os tratamentos de secagem em silo secador com ar aquecido a 60°C (T1) e terreiro suspenso (T3) demonstraram melhor desenvolvimento e eficiência no processo de secagem ao longo do tempo, com médias de teor de água final de 7,13% e 7,92% em base úmida, e taxa de secagem de 3,9% por hora para os dois tratamentos.

De modo geral, todos os tratamentos demonstraram alcançar o teor de água ideal, que é de 7 a 8%, para o cacau, ao fim do processo de secagem. Essa condição garante a continuidade das mudanças químicas das amêndoas contribuindo para aumentar o sabor e aroma característico do chocolate (Martins et al., 2011). Em todos os procedimentos de tratamento, observou-se uma coloração das amêndoas que se apresentou como um matiz de marrom escuro, o que reforça a eficácia do processo de secagem.

Na modelagem matemática da cinética de secagem para as amêndoas de cacau (*Theobroma cacao L.*), a Tabela 3 descreve os modelos de Henderson e Pabis (Equação 3), Valcam (Equação 7) e Page (Equação 4). Nesta, é possível observar os ajustes para os tratamentos de secagem com silo secador com ar aquecido a 60°C (T1), secagem com silo secador sem ar aquecido (T2) e secagem em terreiro suspenso (T3), respectivamente utilizados neste estudo. Os valores do coeficiente de determinação (R²), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e as constantes do modelo estão descritos para os tratamentos T1, T2 e T3.

Os modelos das Equações 3, 7 e 4 exibiram valores satisfatórios dos erros médios relativos e estimados, bem como um alto coeficiente de determinação (R²) para seus respectivos tratamentos. Valores de erro relativo médio abaixo de 10% significam um bom ajuste de dados para o fenômeno de secagem de acordo com (Madamba et al., 1996) e confirmado por (Mohapatra & Rao, 2005).

Tabela 3 - Coeficientes de determinação (R², %), erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE) dos modelos de Henderson e Pabis, Valcam e Page ajustados à curva de secagem de amêndoas de cacau.

Tratamento	Equação	Parâmetros Estatístico		
		P	SE	R ²
T1	3	0,20%	0,02%	98,87%
T2	7	1,15%	0,00%	97,52%
T3	4	0,10%	0,01%	99,27%

Fonte: Autores.

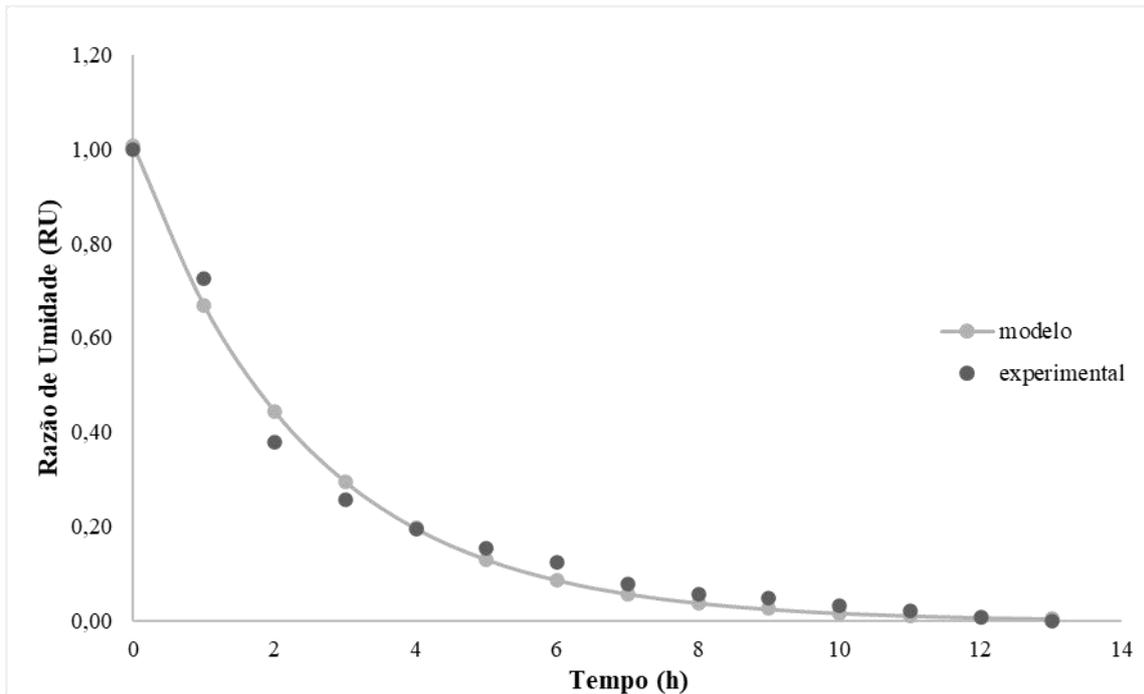
Tabela 4 - Coeficiente das constantes dos modelos de Henderson e Pabis, Valcam e Page ajustados a curva de secagem das amêndoas de cacau.

Tratamento	modelo	Coeficientes							
		k	a	b	c	d	n	k0	k1
T1	3	0,4	1,00	-	-	-	-	-	-
T2	7	-	0,97	-0,22	0,05	-0,00	-	-	-
T3	4	0,26	-	-	-	-	1,0	-	-

Fonte: Autores.

O cálculo da razão de umidade (RU) durante a secagem nos diferentes tratamentos de acordo com o tempo foi realizado através da Equação 11. As Figuras 6, 7 e 8 mostram a comparação dos valores simulados dos modelos e os valores experimentais à variação da razão de umidade (RU), estes dados são postos em função do tempo conforme descrito pelos modelos de Henderson e Pabis, Valcam e Page em que melhor se ajustaram aos dados experimentais dos tratamentos T1, T2 e T3 respectivamente. Dessa forma, exceto o modelo de Valcam, a seleção e a recomendação do melhor modelo fundamentaram-se na simplicidade e no número de coeficientes.

Figura 6 - Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Henderson e Pabis e experimental de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao L.*) nativo das ilhas de várzea de Mocajuba, baixo Tocantins, submetidas a secagem em silo secador com ar aquecido a 60°C (T1).



Fonte: Autores.

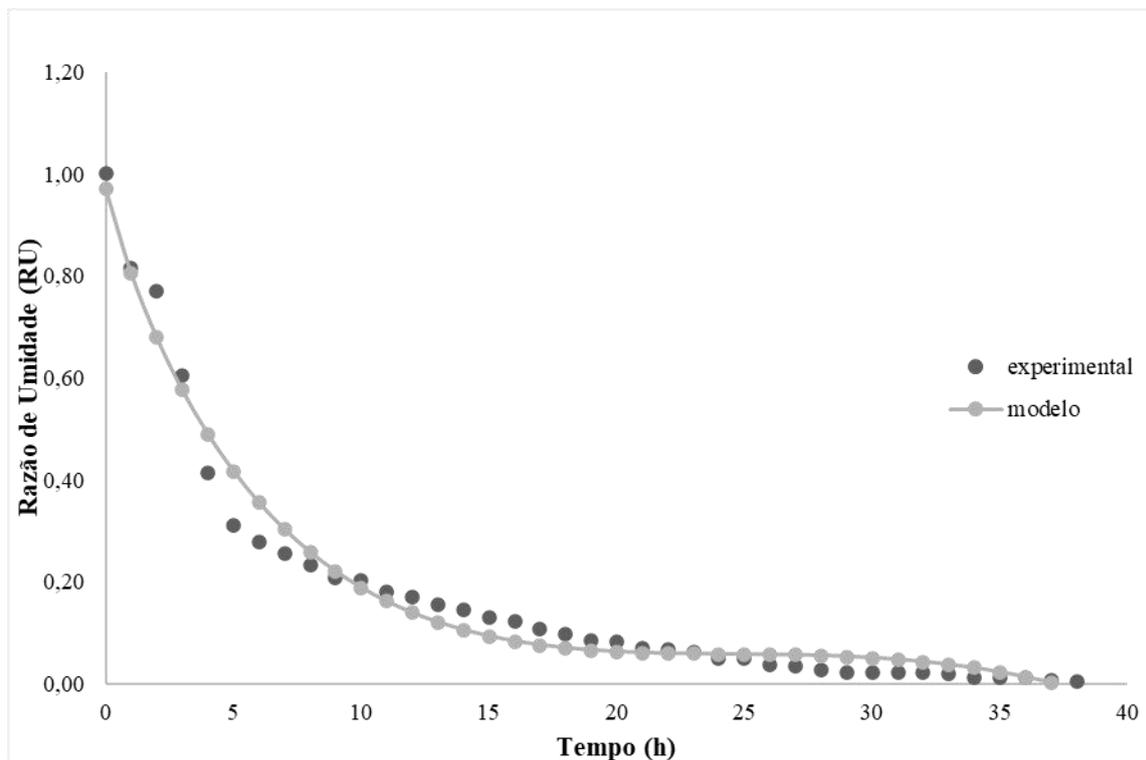
Analisando a Figura 6, verificou-se que o tratamento com o silo secador utilizando ar aquecido a 60°C (T1) apresentou uma rápida redução na razão de umidade em relação ao tempo. No período de 0 a 7 horas, ocorreu uma intensa remoção de água, seguida por uma tendência de estabilização da remoção de água entre as 8 e 13 horas. O processo de secagem durou 13 horas até que a massa de amêndoas atingisse o teor de água de equilíbrio.

No final da secagem, a remoção de água tornou-se mais lenta, demandando maior quantidade de energia para evaporar a água que está internamente ligada nas amêndoas. Características semelhantes foram constatadas por Moraes et al. (2013) quando realizou a secagem de feijão-caupi.

As curvas de secagem do modelo e do experimento apresentaram certa dispersão em alguns pontos no início do processo, durante o intervalo de tempo de 0 a 6 horas. No entanto, das 7 às 13 horas, observou-se um sequenciamento de pontos, indicando um bom ajuste do modelo em relação à secagem experimental no tratamento com silo secador de ar aquecido a 60°C (T1).

O modelo de Henderson e Pabis apresentou o melhor ajuste para a secagem nessas condições, sendo selecionado devido à simplicidade de sua equação. Na literatura, outro estudo sobre a cinética e modelagem de secagem da hortelã-da-folha-miúda (*Mentha x Villosa huds*) em secador de bandejas também encontraram o modelo de Henderson e Pabis como o mais adequado para o ajuste da secagem (Bonfim et al., 2020).

Figura 7 - Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Valcam e experimentais de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao L.*) nativo das ilhas de várzea de Mocajuba, baixo Tocantins, submetidas a secagem em silo secador sem ar aquecido (T2).



Fonte: Autores.

Observou-se na Figura 7 que a secagem em silo secador sem ar aquecido foi a mais longa do experimento, tendo o tempo de secagem de 38 horas. O processo pode ser mais lento em comparação com a secagem com ar aquecido a 60°C (T1), isso ocorre porque a temperatura ambiente tem menos energia para promover a evaporação da água presente na massa de amêndoas.

A baixa temperatura do ar pode não ser suficiente para remover a água interna das amêndoas de forma eficiente, resultando em um maior tempo de secagem. Entretanto, a dependência exclusiva das condições ambientais do local pode tornar o processo de secagem mais vulnerável a variações climáticas, como alta umidade relativa do ar, que pode dificultar a remoção de umidade dos grãos.

A análise das curvas de secagem obtidas experimentalmente em comparação com as curvas previstas pelo modelo de Valcam revelou que houve um bom sequenciamento de pontos na maioria do tempo. Essa observação é fundamental para a validação do modelo, pois indica que os valores previstos pelo mesmo estão em concordância com os valores reais obtidos a partir do experimento.

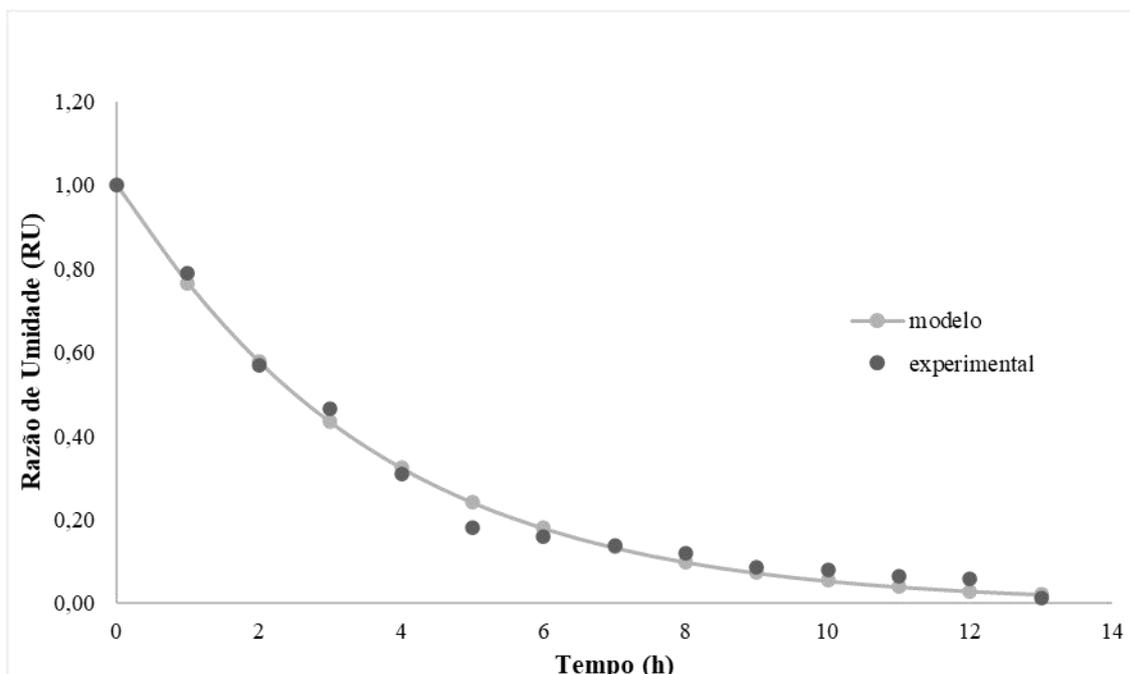
O modelo de Valcam foi selecionado com base em seus excelentes valores de Coeficientes de Determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %) e erro médio estimado (SE), o que o distingue dos demais tratamentos que foram escolhidos devido aos seus valores satisfatórios e à simplicidade da equação.

Além disso, o modelo demonstrou um ajuste satisfatório na secagem com silo secador sem ar aquecido (T2), evidenciando sua capacidade de representar de forma precisa e confiável o comportamento de secagem observado experimentalmente.

Isso implica que o modelo é uma ferramenta útil para prever o comportamento de secagem em condições sem ar aquecido, permitindo sua aplicação na otimização e controle de processos de secagem nesse tipo de sistema. Resultados

semelhantes foram obtidos por Tosta et al. (2020) na cinética de secagem do café (*Coffea arabica L.*) processado de diferentes formas com o uso de enzimas e levedura, onde o modelo de Valcam também apresentou o melhor ajuste ao processo de secagem.

Figura 8 - Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Page e experimentais de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao L.*) nativo das ilhas de várzea de Mocajuba, baixo Tocantins, submetidas a secagem em terreiro suspenso (T3).



Fonte: Autores.

Ao observar a Figura 8, nota-se a sobreposição das curvas do modelo de Page e do experimento, com diversos pontos sequenciados entre elas. A remoção de água diminuiu progressivamente, sendo a desidratação das amêndoas mais rápida no início da secagem e tornando-se mais estável ao final do processo. O tempo total de secagem no terreiro suspenso foi de 13 horas, se igualando ao tratamento de secagem em silo secador com ar aquecido a 60°C (T1), sendo os tratamentos que melhor secaram as amêndoas em função do tempo.

O modelo de Page ajustou-se aceitavelmente em relação ao experimento, podendo-se afirmar que o mesmo apresenta uma performance satisfatória na predição da secagem das amêndoas de cacau em terreiro suspenso. A concordância entre os dados teóricos e observados sugere que o modelo é uma ferramenta útil para representar o comportamento da secagem, fornecendo informações confiáveis sobre o teor de umidade ao longo do tempo.

Dito isso, dentre os modelos que apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, o modelo de Page foi selecionado para representar o fenômeno de secagem do cacau devido a sua simplicidade de aplicação e por ser, tradicionalmente, recomendado e aplicado para prever o fenômeno de secagem de diversos produtos agrícolas como o Feijão (Corrêa et al., 2007), casca de umbu-cajá (Lima et al., 2017), polpa de noni e umbu (Araújo et al., 2021), entre outros.

4. Conclusão

O modelo de Henderson e Pabis foi o mais adequado para o tratamento com ar aquecido a 60°C (T1), o modelo de Valcam apresentou melhor ajuste para o tratamento sem ar aquecido (T2) e o modelo de Page exibiu ajuste satisfatório para a secagem em terreiro suspenso (T3).

A taxa de secagem variou entre os tratamentos, sendo de 3,9% para o tratamento T1, 1,9% para o tratamento T2 e novamente 3,9% para o tratamento T3, indicando que o tempo de secagem e a temperatura exercem influência sobre a taxa de secagem das amêndoas.

O emprego de temperaturas mais elevadas no processo de secagem resulta em uma taxa de secagem maior e mais eficiente, inferindo maior desidratação das amêndoas de cacau.

Agradecimentos

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pelo financiamento da pesquisa; aos pesquisadores e colaboradores do projeto Beneficiamento primário e as propriedades químicas das amêndoas de cacau nativo (*Theobroma cacao L.*) das ilhas de várzea pela oportunidade de realização do presente estudo; e aos orientadores pelo apoio e incentivo acadêmico.

Referências

- Akpınar, E., Midilli, A., & Bicer, Y. (2003). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling. *Energy Conversion and Management*, 44, 1689-1705. 10.1016/S0196-8904(02)00171-1
- Alves, G. E., et al. (2013). Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. *Coffee Science*, 8(2), 238-247. Recuperado de <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/7977>.
- 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. Recuperado de <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1489>.
- Araújo, K. T. A., Queiroz, A. J. de M., Figueirêdo, R. M. F. de, Silva, R. C. da, Amadeu, L. T. S., & Paiva, Y. F. (2021). Drying kinetics and determination of the effective diffusion coefficient of noni and umbu pulps. *Research, Society and Development*, 10(4), e46710413985. 10.33448/rsd-v10i4.13985
- Araújo, M. K. C., & Silva, R. R. C. (2018). Protótipo para caracterização física das sementes do cacauzeiro (*Theobroma cacao L.*). *Revista Energia da Agricultura*, 33(4), 385-390. 10.17224/EnergAgric.2018v33n4p385-390
- Araújo, M. K. C., & Silva, R. R. C. (2022). Amêndoas de cacau (*Theobroma cacao L.*) submetidas a diferentes temperaturas e tempos de secagem no norte brasileiro. *Brazilian Journal of Development*, 8(12), 77409-77421. 10.34117/bjdv8n12-044
- Bonfim, K. S., et al. (2020). Cinética e modelagem de secagem da hortelã-da-folha-miúda (*Mentha x Villosa huds*) em secador de bandejas. *Revista Atena*, Cap. 10, 98-104. 10.22533/at.ed.49020210510
- Brasil. (2009). Regras para análise de sementes. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília.
- Brooker., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1992). Drying and storage of grains and oilseeds. Westport, *The AVI Publishing Company*.
- Costa, L. M., Resende, O., Gonçalves, D. N., & Oliveira, D. E. C. (2015). Modelagem matemática da secagem de frutos de crambe em camada delgada. *Bioscience Journal*, 31(2), 392-403. 10.14393/BJ-v31n2a2015-22340
- Costa, L. M., Resende, O., Gonçalves, D. N., Souza, K. A., Sales, J. F., & Donadon, J. R. (2012). The influence of drying on the physiological quality of crambe fruits. *Acta Scientiarum Agronomy*, 34(2), 213-218. 10.4025/actasciagron.v34i2.12482
- Corrêa, P. C., & Silva, J. S. (2008). Estrutura, composição e propriedades dos grãos. Em *Secagem e Armazenagem de Grãos no Brasil*.
- Corrêa, P. C., et al. (2007). Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em camadas delgadas. *Revista de Engenharia Agrícola*, 27(2), 501-510. 10.1590/1983-21252015v28n323rc
- Corrêa, P. C., et al. (2010). Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica L.*) durante o processo de secagem. *Revista Ceres*, 5, 595-601. 10.1590/S0034-737X2010000500005
- Filho, L. C. C., et al. (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. 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p797-802
- 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*, Online, 1-8. 10.1080/07373937.2020.1767644
- Garcia, D. C., et al. (2004). A secagem de sementes. *Revista Ciência Rural*, 34(2), 603-608. 10.1590/S0103-84782004000200045
- Lima, A. R. C. de., Dos Santos, F. S., da Silva, R. M., Farias Leite, D. D., & Feitosa de Figueiredo, R. M. (2017). Modelagem matemática da cinética de secagem da casca de umbu-cajá. *Revista Brasileira De Agrotecnologia*, 7(2), 97-103. <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/REBAGRO/article/view/5125>.

- Madamba, P.S., Driscoll, R.H., & Buckle, K.A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75-97.
- Martins, J. M., Santos, J. H. F., Silva, W. S., Silva, V. B., Arruda, J. A. P., Nascimento, J. A. R., Dortas, L. C., Freitas, A. J., & Ramos, A. A. (2011). *Melhoria da Qualidade de Cacau*. Ilhéus: CEPLAC/CENEX, 48 páginas.
- Medeiros, A. C. do S., & Eira, M. T. S. da. (2006). Comportamento fisiológico, secagem e armazenamento de sementes florestais nativas (Comunicado Técnico No. 127). Colombo: Embrapa Florestas.
- Melo, P. D. C., et al. (2016). Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 11(3), 247–252. 10.5039/agraria.v11i3a5377
- Mohapatra, D., & Rao, P. S. (2005). A Thin Layer Drying Model of Parboiled Wheat. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 513-518. 10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023
- Morais, S. J. S., Devilla, I. A., Ferreira, D. A., & Teixeira, I. R. (2013). Mathematical modeling of the drying curves and diffusion coefficient of cowpea grains (*Vigna unguiculata (L.) Walp.*). *Revista Ciência Agronômica*, 44(3), 455-463. 10.1590/S1806-66902013000300006
- Pachêco, N. A., Bastos, T. X., & Creão, L. G. C. (2009). Boletim agrometeorológico de 2008 para Tomé-Açu, PA (Documentos No. 361). Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 36 páginas.
- Rehagro. (2022). Terreiro suspenso no pós-colheita do café: como montar e técnicas de manejo. Retirado em 26 junho de 2023, de <https://rehagro.com.br/blog/terreiro-suspenso-construcao--e-manejo/>.
- Resende, O., Almeida, D. P., Costa, L. M., Mendes, U. C., & Sales, J. de F. (2012). Adzuki beans (*Vigna angularis*) seed quality under several drying conditions. *Food Science and Technology*, 32(1), 151–155. 10.1590/S0101-20612012005000013
- Resende, O., Rodrigues, S., Siqueira, V. C., & Arcanjo, R. V.. (2010). Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora Pierre*) em terreiro de chão batido. *Acta Amazonica*, 40(2), 247–255. 10.1590/S0044-59672010000200002
- Santos, O. L., Reinato, C. H. R., Junqueira, J. D., Franco, E. L., Souza, C. W. A., & Rezende, A. N. (2017). Custo-benefício da secagem de café em diferentes tipos de terreiro. *Revista Agrogeoambiental*, 9(4). 10.18406/2316-1817v9n42017966
- Sales, J. H., & Cândida, T. (2016). Efeito da temperatura sobre a amêndoa de cacau: secador vertical. *Revista GEINTEC*, 6(3), 3437-3446. 10.7198/S2237-072220160003015
- Silva, P. J. N. (2001). Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira. CEPLAC, 125 páginas.
- Tosta, M. F., Salvio, L. G. A., Corrêa, J. L. G., & Andrade, E. T. de. (2020). Drying kinetics mathematical modeling of coffee (*Coffea arabica L.*) processed in different ways and with the use of enzymes and yeast. *Research, Society and Development*, 9(7), e908974359. 10.33448/rsd-v9i7.4359
- Vaz Junior, O. A., Antunes, A. M., Duarte, G. M., & da 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. 10.17224/EnergAgric.2019v34n2p195-2089