



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SAÚDE E PRODUÇÃO ANIMAL NA
AMAZÔNIA**

ISADORA GABRIELE DA SILVA MATOS

**DINÂMICA DE SECAGEM DE FOLHA E CASCA DE MANDIOCA
PARA USO NA ALIMENTAÇÃO ANIMAL**

**BELÉM
2025**

ISADORA GABRIELE DA SILVA MATOS

**DINÂMICA DE SECAGEM DE FOLHA E CASCA DE MANDIOCA
PARA USO NA ALIMENTAÇÃO ANIMAL**

Dissertação de mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em Saúde e
Produção Animal na Amazônia (PPGSPAA)
da Universidade Federal Rural da Amazônia
(UFRA) como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Saúde e Produção Animal na Amazônia.

Orientador: Thiago Carvalho da Silva
Coorientador: Vitor Hugo Maués Macedo

**BELÉM
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M425d Matos, Isadora Gabriele da Silva

Dinâmica de secagem de folha e casca de mandioca para uso na alimentação animal / Isadora Gabriele da Silva Matos. - 2025.

73 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Saúde e Produção Animal na AMAZÔNIA(PPGSPAA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Carvalho da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Vitor Hugo Maués Macedo.

1. curvas de secagem. 2. desidratação. 3. farelo. 4. sustentabilidade. 5. umidade. I. Silva, Thiago Carvalho da, *orient.* II. Título

CDD 636.2085

ISADORA GABRIELE DA SILVA MATOS

DINÂMICA DE SECAGEM DE FOLHA E CASCA DE MANDIOCA PARA USO NA ALIMENTAÇÃO ANIMAL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saúde e Produção Animal na Amazônia (PPGSPAA) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Saúde e Produção Animal na Amazônia.

Data de aprovação: 29/08/2025

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 THIAGO CARVALHO DA SILVA
Data: 24/11/2025 10:11:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Carvalho (Orientador)
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Documento assinado digitalmente
 RICARDO ANDRADE REIS
Data: 24/11/2025 15:40:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Andrade Reis
Universidade Estadual Paulista - UNESP

Documento assinado digitalmente
 EBSON PEREIRA CANDIDO
Data: 24/11/2025 09:29:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ebson Pereira Cândido
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Documento assinado digitalmente
 ALEXANDRE FERNANDES PERAZZO
Data: 23/11/2025 13:45:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Perazzo
Universidade Federal do Piauí - UFPI

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e a Nossa Senhora de Nazaré por me concederem forças para concluir mais esta etapa da minha vida profissional.

Ao meu Amado David, que sempre esteve ao meu lado, acreditando em mim e nunca me deixando desistir. Obrigada por me ajudar a entender assuntos que nem você conhecia, por sempre me ouvir e contribuir nas minhas apresentações. Muito obrigada, meu amor. Te amo!

À minha família, que mesmo distante sempre me apoiou e torceu por mim, celebrando cada conquista dessa jornada.

Aos meus gatinhos, Gorda, Pretinho e Titico, que, apesar de serem animaizinhos, estiveram comigo nas madrugadas de escrita, ficando ao meu redor ou no meu colo quando eu desanimava, ajudando a me acalmar e me distrair com suas brincadeiras.

Ao meu amigo da graduação, Felipe, que sempre esteve presente nos momentos de surto e desespero, pronto para ajudar. Mesmo que nossas vidas sigam caminhos diferentes, sempre estarei torcendo por você e levarei sua amizade comigo para sempre. Muito obrigada!

Minha amiga, Any, sempre me ajudou e me apoiou, estando ao meu lado em todos os momentos em que precisei.

Ao meu amigo e filho científico Luís, obrigada por todo o apoio desde o início dessa história. Sua amizade foi um presente maravilhoso nesta vida. Você é alguém que torna qualquer ambiente melhor por onde passa, sempre conduzindo tudo com alegria e estando disposto a ajudar. Você foi de extrema importância para que eu conseguisse concluir esse trabalho, e só tenho a agradecer. Torço, mais do que nunca, pelo seu sucesso, pois sei que você será um profissional extraordinário. Ps: Um dia vamos no show da gaga juntos.

Aos meus amigos da pós-graduação, Aluizio, Carol e Francy, obrigada por todo o apoio que vocês me deram. Foram muitos perrengues, gambiaras, momentos de desespero, mas também inúmeras alegrias e lembranças inesquecíveis. Ter vocês ao meu lado nessa etapa profissional tornou tudo mais leve. Sou extremamente grata a vocês.

Ao meu filho científico José, que sempre esteve disposto a me ajudar, tanto presencialmente quanto online. Passou várias horas comigo no laboratório, onde compartilhamos diversos momentos de reflexão sobre a vida kkk. Obrigada!

Ao meu orientador, professor Thiago, obrigada por confiar este trabalho a mim,

por acreditar no meu potencial e apoiar meu sonho. O senhor é um grande profissional, que levarei como inspiração.

Ao meu coorientador, professor Vitor Macedo, cuja contribuição foi essencial para este trabalho. Obrigada por sempre esclarecer minhas dúvidas e, especialmente, por todo o apoio na parte estatística.

A todos os membros do grupo GERFAM, obrigada por contribuírem para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A mandioca é uma cultura de grande importância socioeconômica, gerando as raízes e derivados como folhas e casca, usados em dietas de animais como fontes de proteína e energia. A secagem natural desses resíduos facilita o armazenamento, reduz o conteúdo de ácido cianídrico e preserva nutrientes para sua utilização na alimentação animal. Contudo, é essencial compreender o processo de secagem para garantir a qualidade do produto. Dessa forma, objetivou-se caracterizar o processo de secagem natural da folha e da casca de mandioca, definindo o tempo mínimo de secagem para adequada conservação e uso na alimentação animal. O presente estudo foi dividido em dois experimentos. Ambos foram realizados na Fazenda Escola de Igarapé Açu, localizada no município de Igarapé Açu, Pará. No primeiro experimento, avaliou-se a cinética de desidratação de folhas de mandioca em três ensaios distintos. Foram comparados tratamentos com e sem pecíolo nos períodos de outubro e dezembro de 2023 e julho de 2024. No segundo experimento, avaliou-se a cinética de desidratação da casca de mandioca durante os mesmos períodos do primeiro experimento. Em ambos os experimentos, foram elaboradas curvas de desidratação para analisar a perda de umidade dos materiais ao longo do tempo. Para análise, foram utilizados e avaliados os modelos matemáticos de Lewis, Page, Henderson e Pabis, e Midilli. Também, foram analisadas as composições químicas dos alimentos antes e após o processo de desidratação. O modelo de Page ($R^2 > 0,94$, $RMSE < 0,07$, $\chi^2 < 0,006$) mostrou-se eficiente para predizer a secagem da folha e casca de mandioca nas três épocas. Para todas as curvas ajustadas os coeficientes de determinação foram elevados ($R^2 > 0,94$). A composição química dos derivados sofreu variações tanto pela desidratação, quanto pelo fator pecíolo nas folhas. No caso das folhas, vale destacar que a retirada dos pecíolos diminuiu o tempo de secagem, e aumentou o teor de PB. Em regiões de clima tropical úmido, a desidratação das folhas e cascas de mandioca para a produção de farelo é viável, mas depende de condições ambientais específicas. A secagem é mais eficaz em períodos de alta temperatura e umidade relativa entre 40% e 70%. Tal condição permite que a secagem ao sol seja concluída em cerca de três dias nas folhas e cinco dias nas cascas, tornando o farelo adequado para a formulação de rações e armazenamento.

Palavras-chave: curvas de secagem, desidratação, farelo, sustentabilidade, umidade.

ABSTRACT

Cassava is a crop of great socioeconomic importance, producing roots and by-products such as leaves and peels, which can be used in animal diets as sources of protein and energy. Natural drying of these residues facilitates storage, reduces hydrocyanic acid content, and preserves nutrients for use in animal feeding. However, understanding the drying process is essential to ensure product quality. Therefore, this study aimed to characterize the natural drying process of cassava leaves and peels, determining the minimum drying time required for proper conservation and use in animal nutrition. The study was divided into two experiments, both conducted at the Igarapé-Açu School Farm, located in the municipality of Igarapé-Açu, Pará, Brazil. In the first experiment, the dehydration kinetics of cassava leaves were evaluated across three independent trials. Treatments with and without petioles were compared during the periods of October and December 2023 and July 2024. In the second experiment, the dehydration kinetics of cassava peels were assessed during the same periods as in the first experiment. In both experiments, dehydration curves were developed to analyze moisture loss over time. The mathematical models of Lewis, Page, Henderson and Pabis, and Midilli were fitted and evaluated. Additionally, the chemical composition of the materials was analyzed before and after the dehydration process. The Page model ($R^2 > 0.94$, $RMSE < 0.07$, $\chi^2 < 0.006$) proved efficient in predicting the drying behavior of cassava leaves and peels across all three periods. All fitted curves exhibited high coefficients of determination ($R^2 > 0.94$). The chemical composition of the by-products varied due to both the dehydration process and the presence or absence of petioles in the leaves. For the leaves, the removal of petioles reduced drying time and increased crude protein content. In humid tropical regions, the dehydration of cassava leaves and peels for meal production is feasible but depends on specific environmental conditions. Drying is more effective during periods of high temperature and relative humidity between 40% and 70%. Under these conditions, sun drying can be completed in approximately three days for leaves and five days for peels, resulting in a meal suitable for feed formulation and storage.

Keywords: drying curves, dehydration, meal, sustainability, moisture.

Sumário

Contextualização.....	11
Referências bibliográficas.....	12
Capítulo I – Revisão de literatura	13
1.1 Produção animal sustentável	13
1.2 Cultura da Mandioca.....	15
1.2.1 Folha de mandioca.....	16
1.2.2 Casca de mandioca	18
1.3 Conservação de forragens e o processo de desidratação.....	19
1.3.1 Dinâmica de secagem.....	22
1.4 Referências bibliográficas	24
Capítulo II – Dinâmica de secagem de folhas de mandioca para uso na alimentação animal	29
RESUMO.....	29
ABSTRACT	30
2.1 Introdução	31
2.2 Material e métodos.....	32
2.2.1 Localização.....	32
2.2.2 Procedimentos experimentais	33
2.2.2.1 Ensaio 1 (E1).....	34
2.2.2.2 Ensaio 2 (E2).....	34
2.2.2.3 Ensaio 3 (E3).....	34
2.2.2.4 Procedimentos durante a secagem.....	34
2.2.3 Análises laboratoriais	35
2.2.3.1 Determinação da matéria seca (MS)	35
2.2.3.2 Composição Química	35
2.2.4 Relação de umidade (RU)	36
2.2.5 Análises estatísticas	36
2.2.5.1 Curvas de secagem	36
Modelo matemático Equação*	37
2.2.5.2 Composição química	38
2.3 Resultados	39
2.3.1 Curvas de secagem	39
2.3.2 Composição química	42
2.4 Discussão	46
2.4.1 Curvas de secagem	46

2.4.2	Composição Química	48
2.5	Conclusão.....	50
2.6	Referências bibliográficas	50
Capítulo III – Dinâmica de secagem da casca de mandioca para uso na alimentação animal.....		54
RESUMO.....		54
ABSTRACT		55
3.1	Introdução	56
3.2	Material e métodos.....	57
3.2.1	Localização.....	57
3.2.2	Procedimentos experimentais	58
3.2.2.1	Procedimentos durante a secagem.....	59
3.2.3	Análises de laboratório	59
3.2.3.1	Determinação de matéria seca (MS)	59
3.2.3.2	Composição química	60
3.2.4	Relação de umidade (RU)	60
3.2.5	Análise estatística	61
3.2.5.1	Curvas de secagem	61
Modelo matemático	Equação*	61
Ensaio	Modelo de covariância e heterocedasticidade	62
3.2.5.2	Composição química	62
3.3	Resultados	63
3.3.1	Curvas de secagem	63
3.3.2	Composição química	66
3.4	Discussão	68
3.4.1	Curvas de secagem	68
3.4.2	Composição química	69
3.5	Conclusão.....	71
3.6	Referências bibliográficas	71

Contextualização

A crescente preocupação com a sustentabilidade na produção agropecuária tem impulsionado a busca por alternativas que reduzam o desperdício e agreguem valor aos derivados agroindustriais (Fluck *et al.*, 2023). No Brasil, a mandioca destaca-se como uma das culturas de maior relevância social e econômica, principalmente na região Amazônica, onde seu processamento gera resíduos, como folhas e cascas. Tradicionalmente, esses derivados são descartados, o que representa um desperdício de biomassa com potencial para a alimentação animal (Nina *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2022).

A alimentação animal representa um dos principais custos em sistemas de produção animal, e a substituição de ingredientes convencionais por derivados agroindustriais pode ser uma alternativa viável do ponto de vista econômico e ambiental (Goes; Souza, 2013; Oliveira *et al.*, 2013). Nesse contexto, as folhas e cascas de mandioca destacam-se como derivados com potencial para a alimentação animal, fornecendo proteína e energia, respectivamente (Silva *et al.*, 2018). Nas dietas animais podem ser utilizadas na forma de silagem ou de fenos e farelos.

O processo de desidratação desses materiais pode ser realizado de forma artificial ou natural, tendo como principais vantagens a facilitação do armazenamento, o prolongamento da vida útil e a preservação dos valores nutricionais, garantindo uma utilização mais segura e eficiente (Almeida; Ferreira Filho, 2005).

No entanto, a secagem de forma natural enfrenta desafios na região Amazônica devido à elevada umidade relativa do ar, que pode prolongar o tempo de secagem e comprometer a qualidade do produto (Ramos *et al.*, 2020). Dessa forma, observa-se uma escassez de estudos sobre o processo de secagem na região, tornando essencial a realização de pesquisas que possibilitem uma melhor compreensão desse processo, principalmente para a produção de alimentos. Além disso, o aproveitamento dos derivados da mandioca na alimentação animal surge como uma alternativa sustentável e economicamente viável, contribuindo para a redução de impactos ambientais, diminuição dos custos de produção e o fortalecimento da economia regional da Amazônia.

Diante desse cenário, objetivou-se com a realização deste trabalho caracterizar o processo de secagem natural da folha e da casca de mandioca, definindo o tempo mínimo de secagem para adequada conservação em diferentes épocas do ano. A presente dissertação está organizada em três capítulos; o primeiro capítulo consiste em uma revisão de literatura, o segundo capítulo aborda um experimento sobre a dinâmica de secagem de folhas de mandioca, e o terceiro sobre a dinâmica de secagem da casca de mandioca.

Referências bibliográficas

- FLUCK, A. C. *et al.* Alimentos alternativos na alimentação de ruminantes. In: EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL (Org.). **Zootecnia: tópicos atuais em pesquisa - Volume 2**. Editora Científica Digital, 2023. p. 12-31. DOI: 10.37885/230211916. Disponível em: [ALIMENTOS ALTERNATIVOS NA ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES](#). Acesso em: 28 de dez. de 2024.
- GOES, R. H. de T. e B. de; SILVA, L. H. X. da; SOUZA, K. A. de. **Alimentos e alimentação animal**. Dourados, MS: Editora UFGD, 2013.
- NINA, M.M. *et al.* Potencialidade de Manihot esculenta Crantz (Euphorbiaceae) na Floresta Amazônica, Brasil. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 2247-2260, 2021.
- OLIVEIRA, R. L. *et al.* Alimentos Alternativos na Dieta de Ruminantes. **Revista Científica de Produção Animal**, v. 15, n. 2, p. 141–160, 2013.
- RAMOS, A.F. *et al.* **Alimentos e alimentação**. 2020.
- SILVA, L.E.B. *et al.* Aspectos gerais e peculiaridades sobre mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Diversitas Journal**, v. 3, n. 1, p. 13-23, 2018.
- SILVA, M.E.P. *et al.* Potencialidade dos resíduos oriundos do processamento e cultivo da mandioca. In: PANTOJA, M.E.P. et al. (org). Ciências Agrárias: O avanço da ciência no Brasil. São Paulo: **Científica Digital**, v. 5. p. 356-370, 2022.

Capítulo I – Revisão de literatura

A presente revisão de literatura está dividida em três tópicos principais e três subtópicos. O primeiro tópico é a Produção animal sustentável. O segundo, Cultura da mandioca, abordando a folha e a casca de mandioca em seus subtópicos. Por fim, o terceiro tópico, Conservação de forragens e o processo de desidratação, tendo a dinâmica de secagem como seu subtópico.

1.1 Produção animal sustentável

O crescimento populacional ao longo dos anos tem impulsionado uma maior demanda por proteína animal. Consequentemente, observam-se impactos ambientais e sociais cada vez mais significativos, especialmente em relação a disponibilidade dos recursos naturais para atender essa crescente demanda (Vilela, 2016). Diante desse cenário, a pressão global para a adoção de práticas mais sustentáveis nos sistemas de produção tem se intensificado, visando a minimização desses impactos.

O desenvolvimento sustentável busca suprir as necessidades atuais sem comprometer os recursos e as condições essenciais, para que as futuras gerações também possam atendê-las (ONU, 1987). A base desse desenvolvimento está atrelada a princípios da sustentabilidade, que abrange três elementos: econômico, social e ambiental. De acordo com Dias (2016), as empresas do setor de produção animal, assim como as demais indústrias alimentícias, devem alinhar suas práticas aos princípios da sustentabilidade, para garantir a continuidade e a viabilidade de seus negócios a longo prazo.

Atualmente, no agronegócio brasileiro, o que se observa é a geração e o descarte de grandes volumes de resíduos agrícolas e agroindustriais no ambiente. Segundo Rosa *et al* (2011), a produção de resíduos agrícolas está ligada ao desperdício de recursos, às perdas que ocorrem desde a etapa de produção até o consumo, e aos materiais que são gerados ao longo dos processos. No Brasil, algumas culturas produzem grandes volumes de resíduos, e seu acúmulo em locais inadequados pode causar impactos ambientais, como na contaminação do solo e dos recursos hídricos (Fluck *et al.*, 2023).

A região amazônica apresenta diversas agroindústrias que, consequentemente, produzem milhares de toneladas de resíduos agrícolas, proveniente em sua grande maioria de produtos de base vegetal e processamento de frutas (Alamar, 2012). Dentre esses, destacam-se os oriundos do processamento da mandioca, cultura na qual a região possui destaque de produção. A geração de resíduos, na cadeia produtiva da mandioca inicia-se

na colheita das raízes, com o descarte da parte área que não será usada para produção de manivas-sementes no campo (Mota *et al.*, 2011). Após isso, é gerado mais resíduos durante o processamento das raízes, para produção de alimentos como farinha e fécula (Matte; Silva; Zeferino, 2021). Diante disso, a busca por formas de aproveitamento dos resíduos agroindustriais surge como uma estratégia eficaz para auxiliar esses setores na destinação adequada desses derivados. Além de contribuir para a sustentabilidade, essa abordagem também possibilita agregação de valor econômico.

Uma das soluções para destinação desses resíduos no sistema de produção animal é seu uso como alimentos alternativos. Nos sistemas produtivos, a alimentação animal corresponde a maior parte dos custos, sendo os concentrados a fração mais onerosa (Goes; Silva; Souza, 2013). Dessa forma, há uma busca constante por formas de reduzir esses custos de produção.

O aproveitamento dos derivados agroindustriais como alimentos alternativos vem sendo amplamente estudado na nutrição animal, tanto para avaliar valor nutricional e desempenho, quanto para a viabilidade econômica do uso (Oliveira *et al.*, 2013). Como resultado de pesquisas, já se tem a disseminação do uso de alguns derivados por produtores, seja como suplemento na época de escassez de forragem, ou como substituto de um cereal convencional nas dietas (Fluck *et al.*, 2023; Meneghetti; Domingues, 2008). Segundo Oliveira *et al* (2013), a inserção desses derivados na alimentação animal pode ser vantajosa para o produtor rural, principalmente por contribuir a diminuição dos custos. Entretanto, é necessário considerar fatores como a disponibilidade na região, a qualidade nutricional e o custo em comparação a alimentos convencionais.

Essa prática sustentável promove o conceito de economia circular nos sistemas de produção, ao reutilizar e agregar valor a algo que poderia causar impactos ambientais negativos. A Economia Circular surge como uma nova proposta para reestruturar os processos produtivos, promovendo mudanças e desafiando o modelo tradicional da Economia Linear. No qual este modelo, que é amplamente consolidado e adotado mundialmente, consiste no paradigma do "ciclo fechado": extrair, produzir e descartar (Abdalla & Sampaio, 2018).

A economia circular representa uma estratégia para aprimorar a gestão de resíduos, fundamentando-se na valorização e reciclagem desses materiais, com o objetivo de dinamizar as economias em desenvolvimento (Ferronnato *et al.*, 2019). Esse conceito busca implementar mecanismos e processos que promovam transformações industriais

regenerativas e sustentáveis, garantindo impactos positivos para as futuras gerações (Korhonen *et al.*, 2018).

1.2 Cultura da Mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), originária da América do sul e pertencente à família das Euforbiáceas, é produzida principalmente em regiões tropicais e subtropicais (NINA *et al.*, 2021). Segundo Nassar e Ortiz (2010), é uma cultura que demanda baixo investimento de capital e mão de obra, apresenta tolerância a solos secos, ácidos ou inférteis e é eficiente na conversão de energia solar em carboidratos. Sua produção é realizada principalmente por agricultores familiares e comunidades tradicionais, sendo fonte de renda, e fonte de energia na alimentação humana de diversos países, tornando-se uma cultura de relevância socioeconômica (Alves, Felipe e Cardoso, 2022; Silva *et al.*, 2022).

A produção mundial de mandioca se concentra em cinco principais países, que representam cerca de 56,11% do total, sendo eles: Nigéria, República Democrática do Congo, Tailândia, República do Gana e Brasil (FAO, 2023; Peressin *et al.*, 2022). No ano de 2024, o Brasil produziu cerca de 19.059.194 toneladas de mandioca, sendo a região Norte a maior produtora, com destaque para o estado do Pará, que alcançou uma produção de 6.018.607 toneladas (IBGE, 2025).

A mandioca está amplamente presente na alimentação da população brasileira e de outros países, como a Nigéria, sendo consumida de diversas formas, como: cozida, farinha, fécula ou amido, tapioca, goma, entre outros. Além disso, também é usada como insumo em indústrias químicas, papeleiras e como matéria-prima para produção de biocombustíveis (Alves e Modesto Júnior, 2022; Felipe, Alves e Camargo, 2010). Diante disso, ao longo do processamento da mandioca é gerado derivados como a parte área, casca de mandioca, bagaço, manipueira, entre outros (Silva *et al.*, 2022).

Esses derivados sem finalidade de utilização se tornam uma problemática ambiental, pois o descarte e o tratamento inadequados podem gerar impactos negativos no ecossistema, devido à alta quantidade, lenta degradação e produção de subprodutos tóxicos (Cordeiro *et al.*, 2020). De acordo com Silva *et al* (2022), os derivados podem ser utilizados na produção de biofilme, biogás, biofertilizantes, e na alimentação animal, ao qual pode ser usado para substituição de alimentos convencionais em rações.

Um dos principais entraves do uso da mandioca e de seus resíduos na alimentação animal está atrelado a presença de glicosídeos cianogênicos em seus tecidos. Quando o

tecido da planta sofre uma ruptura, esses compostos cianogênicos (linamarina e lotaustralina) produzem ácido cianídrico, um componente altamente tóxico para consumo (De Assis Linhares, Seixa e Maia, 2019). A concentração de ácido cianídrico presente na mandioca é um parâmetro para sua classificação em três categorias: mansa, valores abaixo de 50mg HCN/Kg; moderada, entre 50 e 100 mg HCN/Kg; e venenosa, acima de 100 mg HCN/Kg (Chisté & Cohen, 2008). Apesar disso, esse composto é facilmente volátil, podendo ser dissipado após ação de alguns processos sobre planta, como a trituração mecânica, desidratação natural e a ensilagem (Silva *et al.*, 2015).

A mandioca é uma opção interessante para alimentação animal, sendo suas raízes fonte de energia e sua parte aérea rica em proteínas digestível (Silva *et al.*, 2018). Dessa forma, para a produção de um alimento destinado ao consumo animal, é necessário compreender as características dos alimentos e o processamento que será aplicado.

1.2.1 Folha de mandioca

A parte área da planta de mandioca corresponde a porção acima do solo, sendo constituída por hastes, pecíolos e folhas em proporções variáveis (Almeida & Filho, 2005). Durante a colheita das raízes, apenas 20% da parte área é utilizada como manivela para plantio de novas áreas, o restante é descartado no campo, o qual poderia ser usado na alimentação animal (Fernandes *et al.*, 2023).

As folhas de mandioca apresentam características favoráveis, como fonte de proteínas em dietas humanas e animais, e na produção de rações mais nutritivas. Além dos elevados teores de proteínas, vitaminas e minerais, apresentam baixo custo e boa disponibilidade, tornando-se uma alternativa para substituição de alimentos convencionais (Modesto *et al.*, 2007; Tinini *et al.*, 2021).

Os valores de proteína bruta nas folhas de mandioca podem variar conforme a idade de colheita e variedades. Como podemos observar no estudo de Modesto Júnior *et al* (2018), que identificaram valores de proteína entre 19% e 29,7% em folhas de mandioca provenientes de 9 variedades colhidas aos 6 meses. Já Modesto *et al.* (2001), em um estudo com 5 variedades e 10 idades de colheita, observaram teores de proteína bruta variando entre 20,7% e 38,4% nas folhas. Apesar de suas características nutricionais relevantes, as folhas de mandioca possuem toxicidade, devido a presença de glicosídeos cianogênicos, e aspectos antinutricionais como os elevados teores de fibras, taninos, compostos fenólicos e ácido fitico, os quais podem afetar a biodisponibilidade e

digestibilidade dos nutrientes (Montagnac, Davis e Tanumihardjo, 2009; Modesto Júnior *et al.*, 2018).

As folhas de mandioca podem ser processadas de diversas formas a alimentação animal, como a ensilagem, que resulta na silagem, e a desidratação, que dá origem ao feno ou farelo. A desidratação das folhas diminui de 70% a 80% de umidade do material, podendo aumentar a concentração dos componentes nutricionais e diminuir os teores de ácido cianídrico, e facilitar a forma de incorporação do produto em rações (Almeida e Ferreira Filho, 2005). Em relação a produção de feno, Souza *et al.* (2012) ao avaliarem diferentes frações da parte aérea da planta de mandioca, observaram valores entre 2,13 e 4,47 t/ha na matéria seca, apresentando um rendimento entre 25% e 26%. Vale ressaltar que esses valores podem alterar conforme a idade de colheita, variedade, manejo da cultura, entre outros fatores.

Diversos estudos têm sido conduzidos para avaliar o potencial da folha de mandioca desidratada como um alimento alternativo para nutrição animal, analisando seus processos e composições químicas (Tabela 1).

Tabela 1. Pesquisas sobre os processos de secagem e composição química de parte área e folhas de mandiocas.

Alimento	Processo de secagem	Tempo (Horas)	MS (%)	PB (%)	FB (%)	FDN (%)	Referência
Feno de parte aérea	Ao sol	72	93,4	24,9	-	34,4	Wanapat <i>et al.</i> , 1997
Farelo da folha	Ao sol	48	90,9	21,0	17,3	-	Silva, Fonseca e Filho, 2000
Feno da rama	Ao sol	72	90,9	17,9	25,9	-	Figueiredo <i>et al.</i> , 2012
Feno da folha	Industrial	-	91,3	17,8	-	67,3	Guimarães <i>et al.</i> , 2014
Farelo da folha	-	-	92,7	21,9	24,5	-	Azevedo <i>et al.</i> , 2016
Farelo da folha	À sombra	120	92,0	20,9	10,9	38,1	Soares, 2016
Farelo da folha	Ao sol	48	92,5	25,6	12,5	-	Melesse, Masebo e Abebe, 2018
Feno da folha	À sombra	72	89,5	15,1	-	48,6	Silva <i>et al.</i> , 2020
Farinha da folha	Ao sol	72	91,9	24,2	18,5	-	Olude <i>et al.</i> , 2021
Feno da rama	Casa de vegetação	48	94,4	19,7	12,6	71,6	Alburquerque <i>et al.</i> , 2024

MS – Matéria seca; PB – Proteína bruta; FB – Fibra bruta; FDN – Fibra em detergente neutro

No estudo de Melesse, Masebo e Abebe (2018), a substituição do farelo de semente de Níger pelo farelo de folha de mandioca, em até 4%, apresentou melhorias no desempenho de frangos de corte, mostrando-se uma alternativa proteica viável para pequenos produtores na Etiópia. Além disso, em dietas de ovinos confinados, a substituição do feno de tifton 85 pelo feno de parte área de mandioca promoveu melhorias no ganho de peso e comportamento ingestivo (Silva *et al.*, 2020).

1.2.2 Casca de mandioca

No decorrer da etapa inicial da fabricação de farinha ou fécula, o processamento da raiz de mandioca gera como resíduo a casca de mandioca, constituída de casca externa, entrecasca e ponta (Dourado *et al.*, 2020). Esse resíduo corresponde a cerca de 5% do peso total das raízes de mandioca, podendo variar conforme a cultivar, idade de colheita, grau de contaminação com o solo e tipo do solo (Santana *et al.*, 2014).

Assim como as folhas, a casca de mandioca possui potencial para ser utilizada na alimentação animal, sendo caracterizada principalmente como uma fonte energética. Estudos conduzidos para avaliar a composição química desse derivado, observaram valores médios de matéria seca entre 29,6% e 32,4%, proteína bruta entre 2,1% e 4,5%, e fibra em detergente neutro variando de 20,5% a 52,1% (Ferreira *et al.*, 2007; Gunun *et al.*, 2023). Além disso, a casca de mandioca é considerada uma fonte energética devido a sua concentração de amido, que está em torno de 60,6%, podendo variar conforme o método da extração da casca (Souto *et al.*, 2016). Vale ressaltar que por se tratar de um derivado oriundo de agroindústrias, a composição química pode variar de acordo com a cultivar, idade de colheita e método de processamento.

A casca de mandioca é uma alternativa energética na alimentação animal, que pode substituir alimentos convencionais, como o milho (Marques *et al.*, 2000). Entretanto, um dos fatores limitantes no uso da casca de mandioca, além do HCN, é o seu elevado teor de umidade (Dourado *et al.*, 2020), que dificulta o armazenamento e pode prejudicar a qualidade nutricional. Sendo assim, a secagem representa uma alternativa para preservar as características nutricionais e facilitar seu uso. Alguns estudos vêm sendo realizados ao longo dos anos, avaliando as composições químicas desse derivado após o processo de secagem (Tabela 2).

Tabela 2. Pesquisas relacionadas ao processo de secagem e composição química da casca de mandioca desidratada

Alimento	Secagem	Horas	MS (%)	PB (%)	FB (%)	FDN (%)	Amido (%)	Referência
Farinha da casca	Ao sol	168	86,2	5,1	16,7	-	-	Ogbonna & Adebawale, 1993
Casca desidratada	Ao sol	-	89,7	3,6	-	33,1	58,3	Caldas Netos <i>et al.</i> , 2000
Casca desidratada	Ao sol	72	88,7	3,4	-	28,6	58,1	Prado <i>et al.</i> , 2000
Casca desidratada	Ao sol	72	80,5	4,5	-	42,9	35,4	Menezes <i>et al.</i> , 2004
Casca desidratada	A sombra	168-240	76,3	4,4	-	-	-	Faria <i>et al.</i> , 2011
Farinha da casca	Estufa a 80°C	-	90,9	4,1	3,3	-	-	Adeyemo <i>et al.</i> , 2014
Casca desidratada	Industrial	-	90,6	5,5	-	22,6	-	Guimarães <i>et al.</i> , 2016
Casca desidratada	Ao sol	72	90,6	5,2	4,6	-	-	Ojediran <i>et al.</i> , 2024

Nota: MS – Matéria seca; PB – Proteína bruta; FB - Fibra bruta; FDN – Fibra em detergente neutro

Da mesma forma, podemos encontrar estudos que avaliam o uso da casca de mandioca desidratada e seus efeitos sobre o desempenho animal. Na pesquisa de Michelan *et al.* (2000), foi observado em seus resultados de desempenho em coelhos em crescimento, que a casca de mandioca desidratada pode ser incorporada em até 24,3% nas rações, substituindo totalmente a energia digestível do farelo de trigo. No estudo de Santos *et al.* (2015), constatou-se que a casca de mandioca desidratada pode substituir integralmente o milho nas dietas de ovinos, sem comprometer o consumo e a digestibilidade dos nutrientes, além de não alterar os parâmetros ruminais e a dinâmica ruminal da fibra.

1.3 Conservação de forragens e o processo de desidratação

Em regiões de clima tropical, ocorre, em determinado período do ano, uma fase caracterizada pela escassez de chuvas, conhecida como "estação seca". Durante esse período, os pastos sofrem reduções tanto na disponibilidade quanto na qualidade. Diante desse cenário, torna-se essencial que as propriedades adotem estratégias para suprir a oferta de alimentos e atender às exigências nutricionais dos animais, garantindo que seu desempenho produtivo não seja comprometido (Jobim e Júnior, 2015; Mezzomo, Vargas e Regô, 2023).

O uso de alimentos volumosos conservados é uma das estratégias mais comuns adotadas pelas propriedades. Entretanto, para evitar impactos financeiros negativos para o sistema de produção, dado ao alto custo envolvido, é necessário um planejamento eficiente e condução adequada (Bumbieris Junior *et al.*, 2008). A conservação de forragens consiste no armazenamento e preservação do valor nutritivo, para que se apresente estável até o momento de sua utilização (Da Silva *et al.*, 2014). Nesse contexto, duas formas de conservação se destacam como as mais praticadas nas propriedades rurais, a ensilagem e a fenação, que podem ser consideradas complementares, devido as diferenças nos alimentos produzidos (Reis e Moreira, 2017).

O processo de ensilagem, baseia-se em preservar o alimento e sua composição química em ambiente anaeróbico, promovendo o desenvolvimento de microrganismos produtores de ácido lático. Esse ácido orgânico reduz o pH, inibindo o desenvolvimento de microrganismos indesejáveis que podem deteriorar o alimento e alterar seu valor nutritivo (Da Silva Macedo *et al.*, 2017). Segundo Reis e Moreira (2017), esse método de conservação é o mais adotado no Brasil, principalmente pelo uso de máquinas simples e ao seu menor custo em relação a fenação.

O outro processo é a fenação, cujo princípio básico é a conservação do valor nutritivo da forrageira, através de uma rápida desidratação. Isso ocorre devido à paralisação das atividades enzimáticas da planta e dos microrganismos, quando a forrageira é cortada e exposta ao ambiente. Como produto desse processo, obtém-se o feno, no qual o teor de umidade é reduzido para aproximadamente 15% (Ramos *et al.*, 2020; Reis, Evangelista e Basso, 2010). Segundo Reis, Evangelista e Basso (2010), alguns fatores podem influenciar a qualidade do feno, incluindo os relacionados as plantas que serão fenadas, as condições climáticas durante a secagem e o sistema de armazenamento adotado.

De acordo com Ramos *et al* (2020), o processo de fenação é caracterizado pelas seguintes etapas:



De forma sucinta, o processo de fenação começa com o corte da planta forrageira, após alcançar sua produtividade máxima e um ideal valor nutricional. Essa etapa é crucial para a qualidade final do feno, pois, dependendo da região, o momento ideal de corte da

forrageira pode coincidir com o período das chuvas, comprometendo o processo. Após o corte, a forragem apresenta um elevado teor de água (70 a 80%). Portanto, para se obter uma secagem mais eficiente, são necessários os seguintes cuidados: espalhar a forragem no campo, condições climáticas favoráveis (baixa umidade do ar, altas temperaturas e velocidade do vento) e revolvimento do material (Ramos *et al.*, 2020). Quando a forragem apresentar entre 10 e 18% de umidade, considera-se finalizada a secagem, assim, o material é enleirado para prosseguir ao enfardamento. Em seguida, o feno deve ser armazenado em local livre de umidade, bem arejado e sem incidência direta de radiação solar (Evangelista e Lima, 2013).

Para a escolha da forrageira ideal para fenação, é necessário observar algumas características, como: valor nutritivo coerente com a demanda do rebanho, alta produção de forragem por unidade de área, alta relação folha: caule e caules finos, boa capacidade de rebrota e hábito de crescimento que facilite o processo (Evangelista e Lima, 2013). Para além das forrageiras, outros alimentos com potencial para alimentação animal podem ser desidratados, entretanto, é necessário adequar a tecnologia.

O processo de desidratação de alimentos agroindustriais pode ser classificado de acordo com o seu tipo de secagem, sendo dividido em secagem natural e secagem artificial. A secagem natural é comumente realizada em regiões de clima tropical subdesenvolvidas e em desenvolvimento, onde as condições climáticas favorecem esse tipo de secagem, além de demandar baixos investimentos para execução. Esse tipo de secagem é considerado de baixo custo pois consiste basicamente em espalhar o alimento sobre um objeto ou material plástico, e expor ao sol (Celestino, 2010; Silva *et al.*, 2008). Além disso, é uma alternativa acessível e sustentável, principalmente para pequenos produtores.

Na secagem artificial, o processo é realizado por meio de equipamentos no qual o alimento é adicionado e a desidratação ocorre durante determinado período. Normalmente, utiliza-se ar quente com velocidade de 0,5 m/s a 3 m/s e baixa umidade, no caso de transferência de calor por convecção, podendo ocorrer também por condução e radiação. Na prática, o uso de secadores comerciais é mais comum devido a presença de termostatos que regulam a temperatura. Dentre os tipos de secadores, tem-se: secador de bandeja, secador de túnel, tambor rotativo, liofilizador, entre outros (Celestino, 2010).

Diante disso, a secagem de produtos agrícolas é um dos processos mais utilizados para garantir qualidade e estabilidade ao longo do armazenamento, visto que a redução do conteúdo de água, diminui a atividade biológica e as alterações químicas e físicas

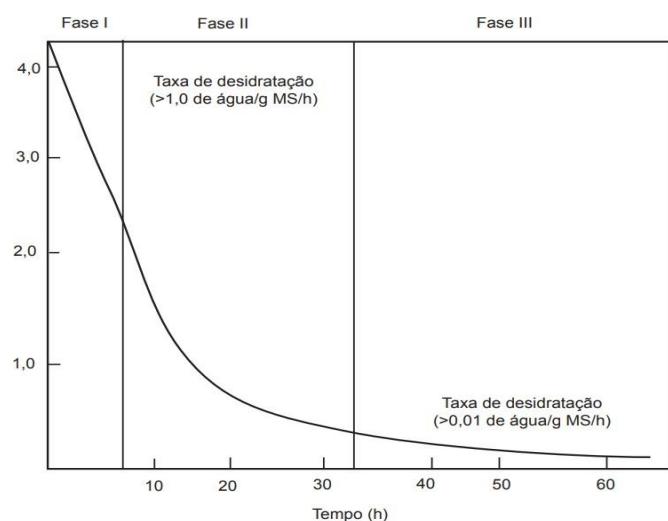
(Resende *et al.*, 2008). No entanto, para otimizar esse processo e maximizar a eficiência e preservação dos nutrientes, é essencial compreender a dinâmica de remoção de umidade ao longo do tempo.

1.3.1 Dinâmica de secagem

A secagem consiste na remoção de umidade de um determinado produto por meio da transferência simultânea de calor e massa entre o produto e o ar de secagem. Essa remoção ocorre devido a movimentação da água, resultante da diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto e o ar ao seu redor. Esse processo deve ocorrer até o momento em que a umidade do produto atinja um equilíbrio com a do ar do ambiente que será armazenado (Silva *et al.*, 2008). Cada produto possui características distintas, portanto, é necessário compreender o comportamento durante o processo de secagem, para poder adequar o método e as condições (Silva *et al.*, 2015; Resende *et al.*, 2008).

A velocidade com que cada produto perde umidade, é conhecida como cinética de secagem. Esse processo é influenciado tanto pelas características do produto quanto por variáveis como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar (Celestino, 2010). Quando se trata de forrageiras, o comportamento do conteúdo de água durante o processo de desidratação pode ser observado por meio da curva de secagem, que apresenta um formato exponencial (Figura 1). Apesar do padrão de perda de água seja uniforme em condições constantes de ambiente, o período de secagem pode ser divido em 3 fases, as quais diferem na duração, na taxa de perda de água e na resistência a desidratação (Reis, Evangelista e Basso, 2010).

Figura 1. Curva de secagem de plantas forrageiras sob condições ambientais uniformes



Fonte: Evangelista e Lima (2013)

Na primeira fase, ocorre uma intensa e rápida perda de água, resultante da abertura dos estômatos, que permanecem abertos por cerca de 1 a 3 horas após o corte. Com isso, o déficit da pressão de vapor entre a forragem e o ar é alta, provocando uma perda de água em torno de 1g/g de MS/h, podendo corresponder de 20 a 30% do total de água removida. Durante a desidratação, a progressiva perda de água e o sombreamento causado pelo enleiramento da forragem, provoca o fechamento dos estômatos. Na segunda fase, a perda de água ocorre por meio da evaporação cuticular, sendo mais lenta devido à maior resistência a desidratação, que é influenciada pelas características das plantas e do tecido vegetal. Nesta fase, espera-se uma remoção de aproximadamente de 70 a 80% da água total (Evangelista e Lima, 2013; Reis, Evangelista e Basso, 2010).

A última fase inicia-se quando a forrageira atinge umidade entre 45% e 50%. Nessa etapa, a desidratação ocorre por meio da plasmólise, tornando-se mais rápida devido a perda da permeabilidade seletiva da planta. Sob essas condições, essa fase torna-se mais sensível as variáveis climáticas, principalmente a umidade relativa do ar (Evangelista e Lima, 2013; Reis, Evangelista e Basso, 2010).

Em relação a secagem de produtos agrícolas, segundo Silva *et al.* (2008), diversas hipóteses explicam a movimentação da água durante a secagem, sendo a mais aceita a do movimento capilar. Nesta hipótese, o processo de secagem pode ser dividido em: período de razão constante e período da razão decrescente, este último subdividido em primeiro, segundo e terceiro períodos.

O período da razão constante ocorre rapidamente, pois neste momento o material apresenta alta umidade, e a água, ainda em sua fase líquida, escoa sob um gradiente hidráulico. Neste momento, a temperatura do produto é igual à do bulbo molhado e, a energia usada para a secagem do produto é equivalente à necessária para evaporação da água em superfície livre (Silva *et al.*, 2008).

Em seguida, se tem o primeiro período da razão decrescente, que se inicia com a passagem pelo ponto de umidade crítica, em que a água do produto deixa de se comportar como água livre. Nessa etapa, a água se liga as partículas solidas do produto, formando pontes líquidas, e o escoamento passa a ser principalmente capilar, tornando-se mais lento. Além disso, a temperatura do produto excede a temperatura do bulbo molhado. No segundo período de razão decrescente, a água está localizada nos gargalos dos poros, e movimenta-se entre as paredes capilares, ou evapora e condensa repetidamente entre as pontes líquidas. Com isso, se tem que nesse momento a pressão parcial de vapor decresce e a contração do volume continua, porém mais lenta. No último período decrescente, a

secagem ocorre dentro do produto, e espera-se que o equilíbrio higroscópio seja alcançado, podendo ser finalizada a secagem (Silva *et al.*, 2008).

Diante do exposto, entender o comportamento da secagem é essencial para otimizar a preservação dos nutrientes e garantir a qualidade dos derivados destinados à alimentação animal. No entanto, para que a desidratação ocorra de forma eficiente, é fundamental adotar diversos cuidados tanto com a matéria-prima quanto com o seu processamento.

1.4 Referências bibliográficas

ABDALLA, F. A.; SAMPAIO, A. C. F. Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular. **Entorno Geográfico**, Uberlândia, v. 15, p. 82-102, fev./jun. 2018.

ALAMAR, P. D. **Caracterização do perfil de fibras em resíduos agroindustriais amazônicos e de sua capacidade de adsorção seletiva**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Pará) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

ALMEIDA, J.; FERREIRA FILHO, J. **Mandioca: uma boa alternativa para alimentação animal**. 2005.

ALVES, L. R. A.; FELIPE, F. I.; CARDOSO, C.E. L. Importância socioeconômica da mandioca e derivados. **Mandioca: do plantio à colheita**. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2022.

ALVES, R.N.B.; MODESTO JUNIOR, M.S. **Potencialidades da cultura da mandioca no estado do Pará**. 2022.

BUMBIERIS JUNIOR, V.H. *et al.* Forragens conservadas como estratégia no planejamento forrageiro. **Pubvet**, v. 2, p. Art. 374-415, 2022.

CELESTINO, S.M.C. **Princípios de secagem de alimentos**. 2010.

CHISTÉ, R. C.; COHEN, K. de O. Determinação de cianeto total nas farinhas de mandioca do grupo seca e d'água comercializadas na cidade de Belém-PA. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2008.

CORDEIRO, N.K. *et al.* Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 23-34, 2020.

DA SILVA MACÊDO, A.J. *et al.* Microbiologia de silagens: Revisão de Literatura. **REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria**, v. 18, n. 9, p. 1-11, 2017.

DA SILVA, T.C. *et al.* Conservação de forrageiras xerófilas. **REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria**, v. 15, n. 3, p. 1-10, 2014.

DE ASSIS LINHARES, A. L. F.; DA COSTA SEIXAS, B.; DE OLIVEIRA MAIA, M. J. Determinação quantitativa do ácido cianídrico em mandioca. **e-Scientia**, v. 11, n. 2, p. 1-7, 2019.

DIAS, C. P. Sustentabilidade na produção animal. **Revista de Ciência Veterinária e Saúde Pública**, v. 3, p. 333-336, 2016.

DOURADO, D.P. *et al.* Potencialidade da casca da mandioca como resíduo proveniente de fecularia. In: **Agronomia: jornadas científicas-volume 2**. Editora Científica Digital. p. 167-172, 2020.

EVANGELISTA, A.R.; LIMA, J. A. Produção de feno. **Informe Agropecuário**, v. 34, n. 277, p. 43-52, 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAOSTAT. Roma: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 14 jan. 2025.

FELIPE, F.I.; ALVES, L.R.A.; CAMARGO, S. G. C. Panorama e perspectivas para a indústria de fécula de mandioca no Brasil. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 6, p. 134-146, 2010.

FERNANDES, F.D. *et al.* Composição química de silagem e feno da parte aérea e da raspa de raízes de mandioca. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 16, n. 44, p. 1231-1249, 2023.

FERREIRA, G.D.G. *et al.* Valor nutritivo de co-produtos da mandioca. **Rev. Bras. Saúde Prod. An.**, v.8, n.4, p. 364-374, 2007.

FERRONATO, N. *et al.* Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. **Journal of Environmental Management**, v. 230, p. 366-378, 2019.

FLUCK, A. C. *et al.* Alimentos alternativos na alimentação de ruminantes. In: EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL (Org.). **Zootecnia: tópicos atuais em pesquisa - Volume 2**. Editora Científica Digital, 2023. p. 12-31. DOI: 10.37885/230211916. Disponível em: [ALIMENTOS ALTERNATIVOS NA ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES](#). Acesso em: 28 de dez. de 2024.

GUNUN, P. *et al.* Replacing concentrate with yeast-or EM-Fermented cassava peel (YFCP or EMFCP): Effects on the feed intake, feed digestibility, rumen fermentation, and growth performance of goats. **Animals**, v. 13, n. 4, p. 551, 2023.

GOES, R. H. de T. e B. de; SILVA, L. H. X. da; SOUZA, K. A. de. **Alimentos e alimentação animal**. Dourados, MS: Editora UFGD, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (SIDRA). Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado>>. Acesso em: 04 de jan. de 2025.

JOBIM, C.C.; JÚNIOR, V.H.B. estratégias de uso de forragens conservadas em sistemas de produção animal a pasto. **III simpósio de produção animal a pasto**, p. 177, 2015.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular economy: the concept and its limitations. **Ecological economics**, v. 143, p. 37-46, 2018.

MARQUES, J. A. *et al.* Avaliação da mandioca e seus resíduos industriais em substituição ao milho no desempenho de novilhas confinadas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, p. 1528-1536, 2000.

MATTE, W. D.; SILVA, H. M. da; ZEFERINO, C. P. Subprodutos da mandioca como alimento alternativo para frangos de corte. **Pubvet**, v. 15, n. 8, p. 1-11, ago. 2021.

MELESSE, A.; MASEBO, M.; ABEBE, A. The substitution effect of noug seed (*Guizotia abyssinica*) cake with cassava leaf (*Manihot escululata* C.) Meal on feed intake, growth performance, and carcass traits in broiler chickens. **J. Anim. Hus. Dairy Sci**, v. 2, p. 1-9, 2018.

MEZZOMO, R.; VARGAS, J.A.C.; RÊGO, A.C. Por que buscar a intensificação da produção de ruminantes na Amazônia brasileira?. In: **Intensificação da Produção de Animais Ruminantes no Bioma Amazônico**. Editora Sorian, p. 14-21, 2023.

MICHELAN, A.C. *et al.* Utilização da casca de mandioca desidratada na alimentação de coelhos. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 28, n. 1, p. 31-37, 2006.

MODESTO JUNIOR, E.N. *et al.* Caracterização Físico-Química e Determinação de Ácido Cianídrico em Folhas de Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). In: **XXVI Congresso Brasileiro de Ciência dos Alimentos**, 2018.

MODESTO, E.C. *et al.* Composição química das folhas de cinco cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz.) em diferentes épocas de colheita. **Reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia**, v. 38, p. 1033-1034, 2001.

MODESTO, E.C. *et al.* Substituição da silagem de milho pela silagem de rama de mandioca na alimentação de vacas leiteiras: consumo e digestibilidade dos nutrientes. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 29, n. 4, p. 359-364, 2007.

MONTAGNAC, J.A.; DAVIS, C.R.; TANUMIHARDJO, S.A. Nutritional value of cassava for use as a staple food and recent advances for improvement. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 8, n. 3, p. 181-194, 2009.

MOTA, D. *et al.* Perfil de fermentação e perdas na ensilagem de diferentes frações da parte aérea de quatro variedades de mandioca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 7, p. 1466-1473, jul. 2011.

NASSAR, N. M.; ORTIZ, R. Melhorar a Mandioca. **Scientific American**, 2010.

NINA, M.M. *et al.* Potencialidade de *Manihot esculenta* Crantz (Euphorbiaceae) na Floresta Amazônica, Brasil. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 2247-2260, 2021.

OLIVEIRA, R. L. *et al.* Alimentos Alternativos na Dieta de Ruminantes. **Revista Científica de Produção Animal**, v. 15, n. 2, p. 141–160, 2013.

PERESSIN, V.A.; COSTA, N.V.; CARVALHO, J.E.B.; FELTRAN, J.C. Manejo Integrado de Plantas Daninhas Em Mandioca: Um Desafio Ambientalmente Correto. Campinas: **Instituto Agronômico**, 67p, 2022.

RAMOS, A.F. *et al.* **Alimentos e alimentação**. 2020.

REIS, R.A.; EVANGELISTA, A.R.; BASSO, F.C. É possível produzir feno de qualidade em clima tropical?. **V Simpósio sobre Manejo Estratégico da Pastagem**. P. 462-512. 2010.

REIS, R.A.; MOREIRA, A.L. Conservação de forragem como estratégia para otimizar o manejo das pastagens. **FCAV/UNESP, Jaboticabal**, 2017.

RESENDE, O. *et al.* Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.

ROSA, M. F. *et al.* Valorização de resíduos da agroindústria. **II Simpósio internacional sobre gerenciamento de resíduos agropecuários e agroindustriais–II SIGERA**, v. 1, n. 2011, p. 98-105, 2011.

SANTANA, T.P. *et al.* **Caracterização bromatológica de casca de mandioca e da manipueira para utilização na alimentação animal**. 2014.

SANTOS, V.L.F. *et al.* Rumen parameters of sheep fed cassava peel as a replacement for corn. **Small Ruminant Research**, v. 133, p. 88-92, 2015.

SILVA, J. S. *et al.* Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. **Viçosa: Aprenda Fácil**. 2008.

SILVA, J.F.S. *et al.* The replacement of grass hay by cassava foliage hay or spineless cactus improves lamb performance. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, p. 1623-1630, 2020.

SILVA, L.E.B. *et al.* Aspectos gerais e peculiaridades sobre mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Diversitas Journal**, v. 3, n. 1, p. 13-23, 2018.

SILVA, M.E.P. *et al.* Potencialidade dos resíduos oriundos do processamento e cultivo da mandioca. In: PANTOJA, M.E.P. *et al.* (org). Ciências Agrárias: O avanço da ciência no Brasil. São Paulo: **Científica Digital**, v. 5. p. 356-370, 2022.

SILVA, T. G. da. **Concentração de ácido cianídrico (HCN) na maniçoba (Manihot sp) em diferentes idades de corte, frações da planta e formas de conservação**. 2015. 36f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia). Universidade Federal rural de Pernambuco, Recife, 2015.

SOUTO, L.R.F. *et al.* Utilization of residue from cassava starch processing for production of fermentable sugar by enzymatic hydrolysis. **Food Science and Technology**, v.37, p. 19-24, 2016.

TININI, R.C. R. *et al.* Silagem da parte aérea da mandioca como um alimento alternativo na dieta de vacas em lactação revisão de literatura. **Arq. ciênc. vet. zool. UNIPAR**, p. 2405-2405, 2021.

VILELA, Duarte (Ed.). **Pecuária de leite no Brasil**: cenários e avanços tecnológicos. Brasília, DF: Embrapa, 2016.

VILHALVA, D.A.A. *et al.* Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 331-339, 2012.

Capítulo II – Dinâmica de secagem de folhas de mandioca para uso na alimentação animal

RESUMO

Durante a colheita das raízes ocorre o descarte das folhas de mandioca no campo, este derivado pode ser utilizado na alimentação animal nas formas de farelos ou fenos, como fonte de proteína. Objetivou-se caracterizar o processo de secagem natural de folhas de mandioca (com e sem pecíolos) e definir o tempo mínimo de secagem. O experimento foi realizado no município de Igarapé-açu (PA), sendo conduzido três ensaios em outubro e dezembro de 2023, e julho de 2024. Foram avaliadas folhas de mandioca com e sem pecíolo, dispostas em lona plástica preta e expostas direta ao sol. Foram analisados três modelos matemáticos para predição das curvas de secagem: Lewis/Newton, Page, Henderson e Pabis, e Midilli. Como critério de seleção do modelo, foram considerados o coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e erro quadrático médio da estimativa (RMSE). Além disso, foram avaliadas a composição química das folhas antes e depois do processo de desidratação. O modelo de Page ($R^2 > 0,94$, $RMSE < 0,07$, $\chi^2 < 0,006$) mostrou-se eficiente para predizer a secagem de folhas de mandioca nas três épocas. Em todas as curvas ajustadas os coeficientes de determinação foram elevados ($R^2 > 0,94$). Os parâmetros dos modelos dos ensaios 1 e 2 foram, respectivamente, $k=0,243$ e $n=0,636$, e $k=0,161$ e $n=0,812$. No ensaio 3, a desidratação das folhas sem pecíolo foi mais rápida (19h) do que a das com pecíolo (28h). Os parâmetros das folhas com e sem pecíolo foram $k=0,161$ e $n=0,812$, e $k=0,169$ e $n=1,021$, respectivamente. De maneira geral, as curvas de todos os ensaios exibiram o comportamento esperado no processo de secagem, sendo o ensaio 1 o mais eficiente na desidratação das folhas de mandioca. Em relação à composição química, houve interação $C \times P$ na MM, FDN, FDA e HEM entre os ensaios ($p < 0,05$). A conservação apresentou efeito sobre MS, MM, EE, FDA, HEM e CNF ($p < 0,05$). Já o pecíolo teve efeito sobre todas as variáveis, alterando entre os ensaios ($p < 0,05$). A desidratação das folhas resultou em cerca de 80% de MS, e a remoção dos pecíolos aumentou a eficiência da secagem e elevou a concentração de PB. A concentração de MM, EE, FDN, FDA e HEM variou, dependendo dos fatores de desidratação e da remoção dos pecíolos. A desidratação da folha de mandioca é mais eficiente nos meses de julho e outubro, pois as condições ambientais reduzem o tempo de secagem. A remoção dos pecíolos acelera o processo em cerca de 10 horas e aumenta a concentração de PB no farelo. O produto desidratado apresentou adequada conservação da composição química, tornando-se uma fonte de proteína para a formulação de rações animais, e uma alternativa viável para pequenos e médios produtores em regiões de clima tropical úmido.

Palavras-chave: curvas de secagem, desidratação, limbo foliar, pecíolo, umidade.

ABSTRACT

During cassava root harvesting, the leaves are normally discarded in the field; however, this by-product can be used in animal feeding as a protein source in the form of meal or hay. This study aimed to characterize the natural drying process of cassava leaves (with and without petioles) and determine the minimum drying time required. The experiment was conducted in the municipality of Igarapé-Açu, Pará (Brazil), with three trials carried out in October and December 2023, and July 2024. Cassava leaves with and without petioles were evaluated, spread over black plastic tarps and exposed directly to sunlight. Three mathematical models were tested to predict the drying curves: Lewis/Newton, Page, Henderson and Pabis, and Midilli. Model selection criteria included the coefficient of determination (R^2), reduced chi-square (χ^2), and root mean square error (RMSE). In addition, the chemical composition of the leaves was analyzed before and after dehydration. The Page model ($R^2 > 0.94$, $RMSE < 0.07$, $\chi^2 < 0.006$) proved efficient in predicting the drying behavior of cassava leaves in all three periods. All fitted curves presented high coefficients of determination ($R^2 > 0.94$). The model parameters for trials 1 and 2 were $k = 0.243$ and $n = 0.636$, and $k = 0.161$ and $n = 0.812$, respectively. In trial 3, dehydration of leaves without petioles was faster (19 h) than that of leaves with petioles (28 h). The parameters for leaves with and without petioles were $k = 0.161$ and $n = 0.812$, and $k = 0.169$ and $n = 1.021$, respectively. Overall, the drying curves from all trials showed the expected behavior for the dehydration process, with trial 1 exhibiting the greatest drying efficiency. Regarding chemical composition, a $C \times P$ interaction was observed for ash, NDF, ADF, and hemicellulose among the trials ($p < 0.05$). Conservation (fresh vs. dehydrated) affected DM, ash, EE, ADF, hemicellulose, and NFC ($p < 0.05$). Petiole presence affected all variables, with variations among trials ($p < 0.05$). Leaf dehydration resulted in approximately 80% DM, and the removal of petioles increased drying efficiency and crude protein content. The concentrations of ash, EE, NDF, ADF, and hemicellulose varied according to the dehydration conditions and petiole removal. Cassava leaf dehydration is most efficient during July and October, as environmental conditions reduce drying time. Removing the petioles accelerates the process by approximately 10 hours and increases CP concentration in the resulting meal. The dehydrated product showed ideal conditions for conservation and chemical composition, making it a suitable protein source for animal feed formulation and a viable alternative for small and medium-scale farmers in humid tropical regions.

Keywords: drying curves, dehydration, leaf blade, petiole, moisture.

2.1 Introdução

A produção mundial de mandioca está concentrada em cinco países, responsáveis por 56,11% do total: Nigéria, República Democrática do Congo, Tailândia, Gana e Brasil. (Peressin *et al.*, 2022). Na cadeia produtiva da mandioca, durante a colheita das raízes, apenas cerca de 20% da parte área da planta é utilizada na produção de manivas-sementes, enquanto o restante é comumente descartado no campo (Fernandes *et al.*, 2023; Mota *et al.*, 2011). A destinação inadequada de resíduos agroindustriais em locais inadequados pode causar impactos ambientais, como na contaminação do solo e dos recursos hídricos (Fluck *et al.*, 2023).

Dentre os diversos destinos e usos para os derivados da mandioca, a parte aérea, composta por hastes, pecíolos e folhas, é um componente interessante para alimentação animal, por apresentar características nutricionais favoráveis (Almeida e Ferreira Filho, 2005). Nesse contexto, as folhas da mandioca apresentam elevado potencial de utilização em todas as espécies de animais, incluindo ruminantes e não ruminantes, devido ao seu elevado teor de proteína. Segundo a literatura, a proteína bruta varia de 19% a 38%, sendo que esse valor pode variar conforme idade de colheita e variedades da planta (Modesto *et al.*, 2001; Modesto Júnior *et al.*, 2018a). A folha da mandioca pode ser utilizada na forma desidratada, o que possibilita sua conservação e facilita a inclusão em rações para animais (Da Silva *et al.*, 2022).

A secagem das folhas pode ser feita de forma natural ou artificial, sendo a primeira opção a mais acessível (Celestino, 2010). O processo de secagem reduz cerca de 80% a umidade do material, contribuindo para armazenamento, conservação dos nutrientes e facilitar a forma de incorporação do produto em rações (Almeida; Ferreira Filho, 2005). O uso desse derivado desidratado na alimentação de animais tem sido estudado nos últimos anos, apresentando resultados promissores em relação ao desempenho e viabilidade econômica (Melesse, Masebo e Abebe, 2018; Silva *et al.*, 2020). Essa alternativa é especialmente vantajosa para os produtores pois possibilita a redução de custos com alimentação, além de contribuir para a sustentabilidade do sistema. Para a produção eficiente de fenos e farelos com qualidade, além das características da planta, são necessárias condições climáticas ideais para a desidratação (Evangelista & Lima, 2013).

Em regiões de clima tropical úmido, um dos maiores desafios para a produção de fenos é a elevada umidade relativa do ar, que pode comprometer o tempo de secagem no

campo e o armazenamento (Ramos *et al.*, 2020; Ihediwa *et al.*, 2022). Tais características geram recomendações técnicas a nível de campo de não realizar a desidratação desses materiais em regiões de alta umidade. Entretanto, tais regiões apresentam períodos que podem ser favoráveis ao processo de desidratação, o que pode viabilizar a produção desses ingredientes.

Apesar dos benefícios evidentes, há uma escassez de pesquisas e trabalhos científicos que explorem a produção a desidratação da folha de mandioca nessas regiões. Essa falta de informação limita o desenvolvimento de técnicas de manejo e o entendimento das melhores práticas de desidratação, o que é um obstáculo para sua adoção em larga escala na alimentação animal. O aproveitamento das folhas de mandioca na alimentação animal é uma alternativa sustentável e economicamente viável, que pode reduzir impactos ambientais, diminuir custos de produção e fortalecer a economia. Assim, objetivou-se caracterizar o processo de secagem natural de folhas de mandioca (com e sem pecíolos) e definir o tempo mínimo de secagem em diferentes períodos do ano.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Localização

O experimento de campo foi realizado na Fazenda Escola de Igarapé-Açu (FEIGA) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizada no município de Igarapé-açu ($1^{\circ}07'41''$ S, $47^{\circ}36'30''$ W, 53 m de altitude).

O município de Igarapé-açu encontra-se na região Nordeste do Pará, possuindo predominância do tipo climático “Ami”, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por clima chuvoso com pequena estação seca (Bastos e Pacheco, 2011). Em relação as características agrometeorológicas, ao longo do ano o município apresenta temperaturas variando entre 23° e 31° , precipitação média de 162 mm (Figura 2) e, umidade relativa do ar em média de 79% (ClimaTempo, 2024; INMET, 2024). Na figura 3, observa-se a temperatura e umidade relativa do ar nos três ensaios.

Figura 2. Histórico comportamento da chuva e temperatura de Igarapé-Açu

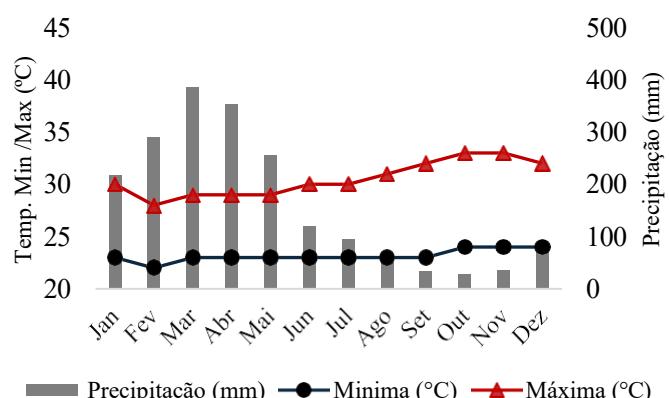
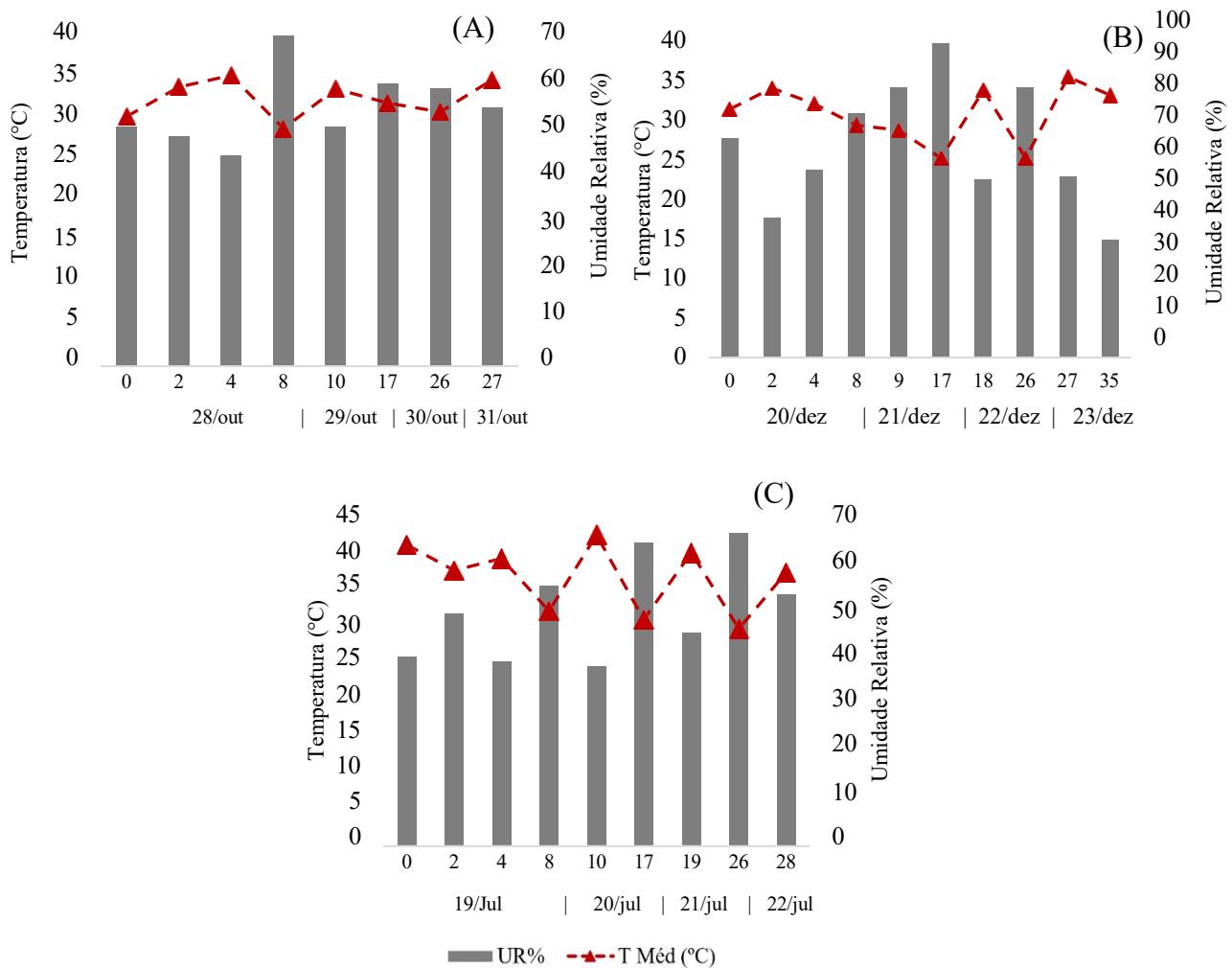


Figura 3. Comportamento da umidade e temperatura de Igarapé-Açu durante o ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e ensaio 3 (C).



2.2.2 Procedimentos experimentais

Realizaram-se três ensaios com o objetivo de avaliar a desidratação de folhas de mandioca expostas à luz solar. As unidades experimentais consistiram em parcelas independentes, medindo $1,5 \times 2,10$ metros, dispostas sobre uma lona plástica preta posicionada no solo. Cada parcela foi composta por aproximadamente 7 kg de folhas, distribuídas em uma camada de cerca de 5 cm de espessura.

Em todos os ensaios foram definidos intervalos de amostragem para o ajuste das curvas de desidratação. Em cada tempo de coleta, retiraram-se aproximadamente 400 g de material, os quais eram posteriormente pesados para determinação da matéria seca e demais análises.

Os períodos de secagem foram conduzidos das 8h às 17h em todos os ensaios, exceto no primeiro dia de secagem do ensaio 3, que teve início às 10h.

2.2.2.1 Ensaio 1 (E1)

Inicialmente, foram selecionadas dez amostras de folhas, dispostas na forma de 10 parcelas sobre a lona plástica, as quais foram submetidas ao processo de secagem. Durante o procedimento, realizaram-se oito coletas por amostra, correspondentes aos tempos de exposição ao sol de 0, 2, 4, 8, 10, 17, 26 e 27 horas. Os dados obtidos a partir dessas coletas foram utilizados para o ajuste das curvas de secagem ao longo do tempo. Em cada coleta, metade das amostras (cinco) tiveram os pecíolos removidos, enquanto na outra metade eles foram mantidos. Esse delineamento experimental teve como finalidade avaliar possíveis variações na composição química entre as amostras com e sem pecíolo.

2.2.2.2 Ensaio 2 (E2)

O segundo ensaio foi realizado em dezembro de 2023. As folhas utilizadas nesse ensaio foram coletadas em uma propriedade rural, que possuía uma lavoura de mandioca (variedade Manteiguinha) com aproximadamente 10 meses de idade. Devido às condições climáticas do período, o experimento foi conduzido em casa de vegetação. Para a secagem, o desenho experimental foi similar ao do primeiro ensaio. Foram consideradas cinco repetições de folhas com pecíolo em dez tempos de exposição ao sol (0, 2, 4, 8, 9, 17, 18, 26, 27 e 35 horas).

2.2.2.3 Ensaio 3 (E3)

O terceiro ensaio foi conduzido em julho de 2024. Neste ensaio as folhas utilizadas eram provenientes de uma lavoura de mandioca da variedade BRS Mari com 1 ano e 1 mês de idade. As curvas de desidratação foram geradas considerando folhas com pecíolo e sem pecíolo, ambas com nove tempos de desidratação (0, 2, 4, 8, 10, 17, 19, 26 e 28 horas). Contudo, para as folhas sem pecíolo, o período de secagem considerado foi até 19 horas, momento em que as amostras atingiram o ponto final de secagem (entre 10% a 20% de umidade).

2.2.2.4 Procedimentos durante a secagem

Para se obter os dados de temperatura e umidade relativa do ar, foi utilizado um termo-higrômetro com sensor (EOS DTH-2), sendo realizadas entre 1 e 2 coletas de dados por dia. Além disso, as folhas eram reviradas duas vezes ao dia, uma pela manhã e outra

à tarde, movendo-as de baixo para cima. Às 17 horas, após a última coleta de amostra do dia, o material era coberto com lona plástica.

A partir do segundo dia, no final da tarde, uma amostra de aproximadamente 50 gramas, era coletada das repetições para determinar a matéria seca pelo método do micro-ondas (Oliveira *et al.*, 2015). A desidratação era encerrada quando o material atingia entre 10 a 20% de umidade, segundo a determinação do microondas. Após o término da desidratação e a coleta da última amostragem, as folhas restantes foram coletadas da lona e trituradas em um triturador forrageiro, com peneira de tamanho 0,8 mm e armazenadas em sacos de polietileno.

2.2.3 Análises laboratoriais

As análises de laboratório foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal (LABNUTAN), localizado no setor da Zootecnia da Universidade Federal Rural da Amazônia – Belém.

2.2.3.1 Determinação da matéria seca (MS)

Para a determinação da matéria seca e demais análises da composição, foram coletadas aproximadamente 400 gramas, em cada tempo de desidratação, e congelados a -20°C para posterior análises. Após serem descongeladas em temperatura ambiente, foram pesadas e submetidas à pré-secagem em estufa de circulação forçada de ar por 72h a 55°C, sendo posteriormente moídas em moinho de faca tipo Willey, com peneira com crivo de 1 mm de diâmetro. Após esse processo, para determinar os teores de matéria seca (MS), usou-se o método INCT G-003/1 (Detmann *et al.*, 2021), no qual pesasse aproximadamente 2 gramas da amostra moída e submete a uma estufa de secagem definitiva a 105°C por 16 horas. Após esses procedimentos, é calculado os teores de matéria seca que foram utilizados na curva.

2.2.3.2 Composição Química

A determinação da composição química foi realizada apenas no tempo inicial (*in natura*) e tempos finais (desidratados) de cada ensaio (27, 35 e 28 horas, nos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente), nas amostras com e sem pecíolo.

Além da determinação dos teores de matéria seca descritos anteriormente, analisou-se a matéria mineral (MM) em forno mufla a 550°C por 3 horas (método INCT

M- 001/2). A concentração de proteína bruta (PB) determinada pelo método Kjeldahl (método INCT- N-001/2). O extrato etéreo (EE) (método INCT G-004/1). Os teores de fibra em detergente neutro (FDN) (método INCT F-002/1), fibra em detergente ácido (FDA) (método INCT- F-004/2) e a hemicelulose calculada pela diferença entre FDN e FDA. E os carboidratos não fibrosos (CNF) calculados conforme a seguinte fórmula: CNF = 100 – (PB + EE + FDN + MM). Todas as análises foram realizadas conforme Detmann *et al.*, 2021.

2.2.4 Relação de umidade (RU)

Para o ajuste dos dados aos modelos matemáticos, os valores de umidade foram expressos na forma de relação de umidade (RU), utilizando-se a equação descrita por Mühlbauer e Müller (2020):

$$RU = \frac{U(t) - U_e}{U_1 - U_e}$$

Onde:

RU = Relação de umidade (adimensional)

U (t) = Umidade no tempo

U₁ = Umidade inicial

U_e = Umidade de equilíbrio

2.2.5 Análises estatísticas

2.2.5.1 Curvas de secagem

Os dados de cinética de secagem foram analisados por meio do ajuste dos valores de umidade expressos tanto em porcentagem quanto em relação de umidade (RU), utilizando o software RStudio.

A cinética de secagem baseada na umidade em porcentagem foi modelada por meio de ajustes de regressão não linear, utilizando o seguinte modelo:

$$\text{Umidade} = a \cdot e^{-b \cdot \text{horas}}$$

Onde:

a = Umidade inicial,

b = Constante de taxa do decaimento exponencial.

Estimativas iniciais dos parâmetros para a foram definidas com base em valores iniciais para cada ensaio, e b como 0,01.

Para as previsões das curvas de secagem expressas em relação de umidade, foram avaliados os ajustes em quatro modelos matemáticos semiempíricos, comumente utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas (Tabela 3).

Tabela 3. Modelos matemáticos utilizados nos ajustes dos dados de RU.

Modelo matemático	Equação*
Lewis/Newton	$RU = \exp(-k \cdot t)$
Page	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$
Henderson e Pabis	$RU = A \cdot \exp(-k \cdot t)$
Midilli	$RU = A \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

k – Constante de secagem; A, b, n – Coeficiente do modelo; t – Tempo (horas)

*Mühlbauer e Müller (2020); Midilli, Kucuk, Yapar (2002); Radünz *et al.* (2011)

Os ajustes foram realizados por meio da função `nls_multstart` do pacote `nls_multstart` da linguagem R, a qual permite múltiplas tentativas de estimativas iniciais, favorecendo a convergência dos parâmetros.

Como critérios de seleção do modelo foram considerados os valores do coeficiente de determinação (R^2), do qui-quadrado reduzido (χ^2) e do erro quadrático médio da estimativa (RMSE), a fim de avaliar a qualidade dos ajustes realizados.

Tanto para a variável umidade quanto relação de umidade, as medidas ao longo do tempo foram tomadas na mesma unidade experimental. Isso indica possível autocorrelação entre as observações ao longo do tempo. Portanto, os modelos escolhidos foram novamente ajustados considerando possíveis estruturas de correlação e heterogeneidade dos erros. Para isso, utilizou-se a função `gnls` do pacote `nlme` na linguagem R, permitindo o ajuste de modelos não lineares generalizados com estruturas específicas para os erros.

Foram testadas diferentes combinações entre estruturas de covariância (independência, autocorrelação de primeira ordem - AR (1), autocorrelação contínua - CAR (1), e modelo autorregressivo-médias móveis - ARMA (1,1)) e modelos de heterocedasticidade (variância constante, exponencial - varExp, potência - varPower e variância distinta por tempo - varIdent).

Diante disso, foram testados 16 modelos de regressão não linear, considerando as combinações. A seleção do modelo foi baseada no critério de informação de Akaike (AIC), sendo escolhido o com menor valor de AIC (Tabela 4). Q-Q plots e teste de normalidade de Shapiro-Wilk, além da obtenção do coeficiente de determinação (R^2) entre os valores ajustados e observados.

Tabela 4. Modelos de regressão não linear selecionados por ensaio.

Ensaio	Pecíolo	Modelo de covariância e heterocedasticidade
1	Com	CAR1_varExp
2	Com	AR1_varExp
3	Com	CAR1_None
	Sem	AR1_None

2.2.5.2 Composição química

Para a composição química, foi considerado um Delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (2×2). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando o procedimento GLIMMIX no SAS (SAS OnDemand for Academics), para testar os efeitos da conservação (*in natura* e desidratado), a presença dos pecíolos (com e sem pecíolos) e a interação entre esses fatores, conforme o modelo estatístico abaixo. As médias foram comparadas por meio do teste de “Tukey”, considerando 0,05 como nível de significância para o erro tipo I ($p < 0,05$). A normalidade dos resíduos foi verificada pelo procedimento UNIVARIATE, com base no teste de Shapiro-Wilk.

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + P_j + (C \times P)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Onde:

Y_{ijk} = Observação da variável resposta no i-ésimo nível de conservação, j-ésimo nível de pecíolo e k-ésima repetição;

μ = média geral;

C_i = efeito do i-ésimo nível de conservação (*in natura* ou *desidratado*);

P_j = efeito do j-ésimo nível de pecíolo (*com* ou *sem*);

$(C \times P)_{ij}$ = efeito da interação entre conservação e pecíolo;

ε_{ijk} = erro aleatório associado ao valor observado.

2.3 Resultados

2.3.1 Curvas de secagem

Na tabela 5, podemos observar que os modelos matemáticos analisados apresentaram ajuste satisfatório em relação ao $R^2 > 0,90$, entretanto, esse parâmetro não deve ser o único para determinar a qualidade dos ajustes (Mamdamba, Driscoll e Buckle, 1996). Diante disso, podemos verificar que os valores de RMSE ($< 0,09$) e do χ^2 ($< 0,009$) também indicam precisão adequada dos modelos, sendo o ideal valores mais próximo de 0 (Panchariya, Popovic e Sharma, 2002).

No entanto, constata-se que os modelos que obtiveram melhores valores nos parâmetros foram o de Page ($R^2 > 0,94$, RMSE $< 0,07$, $\chi^2 < 0,006$) e de Midilli ($R^2 > 0,95$, RMSE $< 0,06$, $\chi^2 < 0,004$) em todos os ensaios e independente da presença do pecíolo. Embora o modelo de Midilli tenha apresentado os melhores valores de ajuste, o modelo de Page foi o escolhido para a predição do processo de secagem nas condições experimentais devido à sua menor complexidade matemática, por ser bi-paramétrico.

Tabela 5. Valores dos parâmetros de seleção calculados para verificação dos ajustes dos modelos matemáticos.

Modelos	Ensaio 1			Ensaio 2		
	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0,9515	0,0686	0,0049	0,9116	0,0934	0,0090
Page	0,9703	0,0537	0,0031	0,9421	0,0756	0,0061
Henderson e Pabis	0,9599	0,0623	0,0042	0,9140	0,0922	0,0090
Midilli	0,9901	0,0311	0,0011	0,9603	0,0626	0,0045
Ensaio 3						
	Com			Sem		
	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0,9243	0,0820	0,0069	0,9639	0,0630	0,0041
Page	0,9400	0,0730	0,0057	0,9640	0,0629	0,0043
Henderson e Pabis	0,9335	0,0768	0,0063	0,9640	0,0629	0,0043
Midilli	0,9598	0,0597	0,0041	0,9645	0,0625	0,0046

A figura 4, apresenta as curvas de umidades elaborados por regressão não linear nos três ensaios. Com base nas curvas de umidade, observa-se que o teor de umidade inicial das folhas nos ensaios 1 e 2 foi de aproximadamente 72%. As folhas atingiram

aproximadamente 14% de umidade após 27 horas de secagem ao sol, no ensaio 1 (Figura 4 A).

Já no ensaio 2, observou-se umidade final de cerca de 20%, alcançada após 35 horas de secagem (Figura 4 B). Em relação ao ensaio 3, podemos observar que a presença dos pecíolos teve influência no processo de secagem (Figura 4 C). Embora em ambos os casos tenham iniciado com uma umidade próxima de 69%, os resultados foram diferentes. O limbo foliar alcançou uma umidade final de cerca de 11% em 19 horas, enquanto as folhas com pecíolo atingiram uma umidade final de aproximadamente 15% após 28 horas de secagem.

Na figura 5, são apresentadas as curvas de secagem obtidas pela conversão dos dados referentes a porcentagem de umidade no parâmetro adimensional de relação de umidade (RU), ajustados ao modelo matemático de Page. No ensaio 1 (Figura 5 A), observa-se um adequado ajuste do modelo para descrever o processo de secagem, com um coeficiente de determinação de $R^2=0,9637$. A curva ajustada ($RU=e^{-(0,2430) \times Horas^{0,6364}}$) indica uma perda de umidade mais acelerada no início do processo, que diminui progressivamente com o tempo, sendo um comportamento característico do período da taxa decrescente.

Em relação ao ensaio 2 (Figura 5 B), o modelo também demonstrou um ajuste satisfatório aos dados experimentais ($R^2=0,9531$). Apesar da dispersão observada nos dados, o modelo se ajustou bem a curva ($RU=e^{-(0,0062) \times Horas^{1,7227}}$) representando a tendência da secagem. No ensaio 3 (Figura 5 C), o modelo de Page representou o processo de secagem de forma satisfatória para as duas situações. A curva “com pecíolo” apresentou um ajuste com $R^2=0,9403$ ($RU=e^{-(0,1619) \times Horas^{0,8123}}$), enquanto a curva “sem pecíolo” teve uma melhora, com $R^2=0,9641$ ($RU=e^{-(0,1692) \times Horas^{1,0214}}$). Novamente, nota-se uma representação típica do processo de secagem. No entanto, fica evidente a influência da retirada dos pecíolos nos parâmetros do modelo e na qualidade do ajuste.

Na tabela 6, apresenta-se os parâmetros obtidos através das equações ajustadas pelo modelo de Page, que contribuem para análise da cinética de secagem dos ensaios. No ensaio 1, os parâmetros dos modelos de Page foram $k=0,2430$ e $n=0,6364$. No ensaio 2, o modelo ajustado resultou em parâmetros de $k=0,0062$ e $n=1,7227$. No ensaio 3, foram obtidos parâmetros separados para cada tratamento. Nas folhas com pecíolo, os valores foram $k=0,1619$ e $n=0,8123$. No limbo foliar os parâmetros foram $k=0,1692$ e $n=1,0214$.

Figura 4. Curvas de umidades elaboradas por regressão não linear para secagem de folhas de mandioca para ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e ensaio 3 (C).

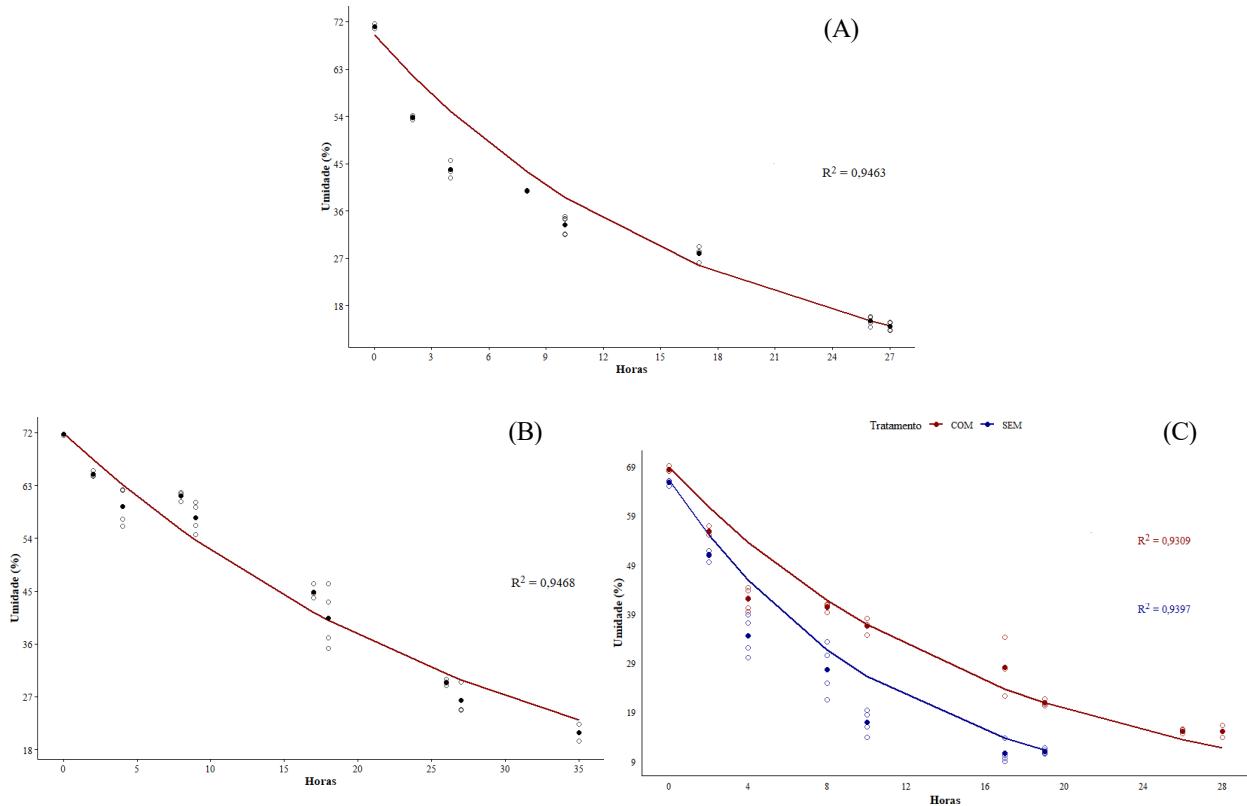
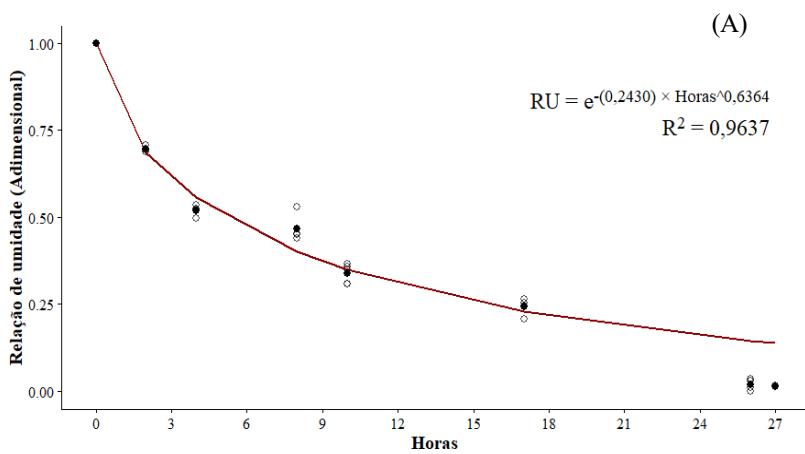


Figura 5. Curvas de secagem preditas pelo modelo de Page com dados ajustados, para secagem de folhas de mandioca no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e ensaio 3 (C).



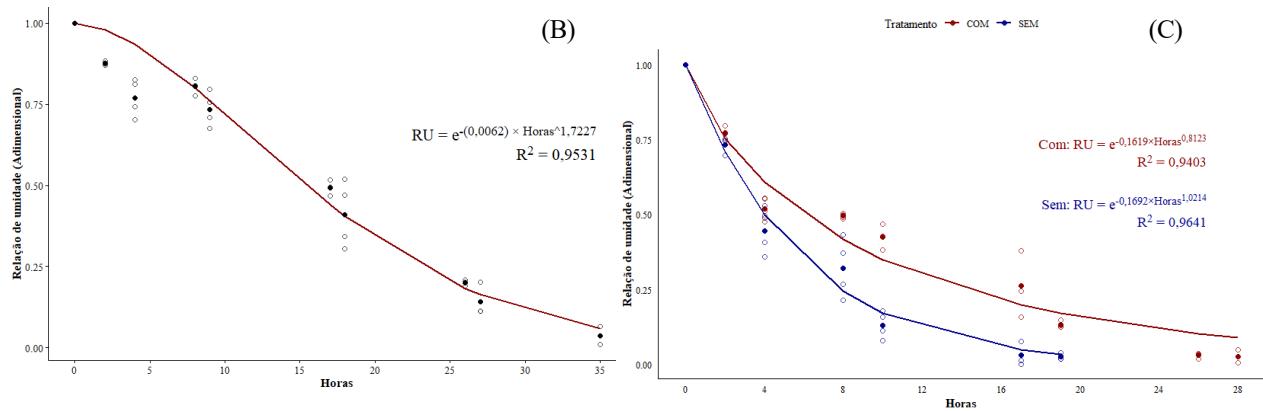


Tabela 6. Parâmetros obtidos do modelo de Page ajustado aos dados de secagem de folhas de mandioca em cada ensaio.

Ensaio 1			Ensaio 2		
k	n	R ²	k	n	R ²
0,2430	0,6364	0,9637	0,1619	0,8123	0,9531
Ensaio 3					
Com			Sem		
k	n	R ²	k	n	R ²
0,1619	0,8123	0,9403	0,1692	1,0214	0,9641

k – Taxa de secagem; n – coeficiente da equação; R² - coeficiente de determinação

2.3.2 Composição química

No ensaio 1, houve efeito de interação C×P ($P<0,05$) sobre os teores de FDA e HEM (Tabela 7). Na FDA, observou-se que o maior teor foi obtido nas folhas com pecíolo, independente da conservação. A folha com pecíolo *in natura* apresentou maior teor de FDA (192,8 g/kg MS) em relação à desidratada (169,2 g/kg MS). A desidratação não alterou essa variável quando o pecíolo foi retirado.

Apesar de ter sido observada interação na fração HEM na anova, a comparação das médias pelo teste de Tukey não apresentou diferenças entre as médias. Esse resultado indica ausência de efeito da desidratação ou da presença do pecíolo sobre a hemicelulose (Tabela 7).

Quanto ao efeito da conservação no ensaio 1 (Tabela 7), observou-se um aumento nos teores de MS, MM e CNF e uma diminuição nos teores de PB e EE, após a desidratação ($P<0,05$). Não foi observado efeito de conservação sobre FDN. Em relação ao pecíolo, verifica-se que a retirada dos pecíolos proporcionou um aumento nos teores de PB e EE e uma redução na MM e FDN ($P<0,05$). As variáveis MS e CNF não foram afetadas pela presença ou não do pecíolo (Tabela 7).

Tabela 7. Composição química da folha de mandioca do ensaio 1.

Ensaio 1						
	Conservação <i>In natura</i>	Conservação Desidratado	Média	EPM	P-valor	
	MS g/kg			0,25	<0,01	0,40
CP	288,9	859,6	574,2			
SP	301,7	855,2	578,4			
Média	295,3b	857,4a				
	MM g/kg			0,26	0,01	<0,01 0,51
CP	65,9	68,5	67,2a			
SP	54,1	57,9	56,0b			
Média	60,0b	63,2a				
	PB g/kg			0,26	0,05	<0,01 0,15
CP	223,2	220,6	221,9b			
SP	249,1	234,5	241,8a			
Média	236,1a	227,6b				
	EE g/kg			0,26	<0,01	<0,01 0,43
CP	54,7	41,5	48,1b			
SP	68,5	57,6	63,1a			
Média	61,6a	49,6b				
	FDN g/kg			0,26	0,06	<0,01 0,25
CP	393,9	390,9	392,4a			
SP	374,8	364,2	369,5b			
Média	384,3	377,5				
	FDA g/kg			0,29	<0,01	<0,01 <0,01
CP	192,8a	169,2b	181,0			
SP	153,7c	151,2c	152,4			
Média	173,2	160,2				
	HEM g/kg			0,25	0,90	0,75 0,02
CP	209,2a	220,4a	214,8			
SP	221,2a	211,0a	216,1			
Média	215,2	215,7				
	CNF g/kg			0,26	0,01	0,80 0,73
CP	264,3	289,5	276,9			
SP	258,4	290,3	274,4			
Média	261,4b	289,9a				

CP – Com pecíolo; SP – Sem pecíolo; MS – Matéria seca; MM – Matéria mineral; PB – Proteína bruta; EE – Extrato Etéreo; FDN – Fibra em detergente neutro; CNF – Carboidratos não fibrosos; FDA – Fibra em detergente ácido; HEM – Hemicelulose

Quanto ao efeito da conservação no ensaio 1 (Tabela 7), observou-se um aumento nos teores de MS, MM e CNF e uma diminuição nos teores de PB e EE, após a desidratação ($P<0,05$). Não foi observado efeito de conservação sobre FDN. Em relação ao pecíolo, verifica-se que a retirada dos pecíolos proporcionou um aumento nos teores de PB e EE e uma redução na MM e FDN ($P<0,05$). As variáveis MS e CNF não foram afetadas pela presença ou não do pecíolo (Tabela 7).

No ensaio 2, verificou-se efeito de interação C × P ($p < 0,05$) sobre a variável MM (Tabela 8). A desidratação promoveu aumento no teor de MM das folhas com pecíolo (64,7 g/kg MS) em relação ao material *in natura* (57,2 g/kg MS). Já nos limbos foliares, os teores de MM permaneceram baixos e não diferiram entre si entre os estados de conservação.

Com base na análise da tabela 8, verifica-se que após a desidratação houve um aumento nos teores de MS e FDA, com redução no EE e HEM ($p < 0,05$). Nos teores de PB, FDN e CNF, não foram observados efeitos da desidratação.

No que se refere a retirada dos pecíolos, nota-se um aumento nas concentrações de MS, PB, EE, e HEM, e uma diminuição na FDA e CNF ($p < 0,05$). Não foram observadas diferenças nas concentrações de FDN (Tabela 8).

No ensaio 3, conforme a análise da tabela 9, observa-se que houve efeito de interação C×P ($p < 0,05$) sobre os teores de FDN, FDA e HEM.

No FDN, verifica-se que após a desidratação, as folhas com pecíolo apresentam maior teor (501,7 g/k MS) em relação as sem pecíolo (477,7 g/kg MS). Não foram observadas diferenças entre os tratamentos nas folhas *in natura*.

Observa-se que na FDA, a desidratação reduziu os teores nas folhas com pecíolo, enquanto nos limbos foliares não houve diferença. As folhas com pecíolo *in natura* obtiveram maior valor de FDA (234,2 g/kg MS).

Sobre o efeito da interação C×P ($p < 0,05$) nos teores de HEM, verificou-se que a desidratação aumentou o teor de HEM nas folhas com pecíolo (308,1 g/kg MS) em relação as *in natura* (286 g/kg MS). Antes da desidratação, os limbos foliares apresentavam maior teor de hemicelulose, porém, após a desidratação não houve mais diferença.

Ainda na tabela 9, observa-se que a desidratação aumentou os teores de MS e CNF, e diminuiu MM e EE ($p < 0,05$). Não houve alteração no teor de PB. Com relação a retirada dos pecíolos, verificou-se um aumento nas frações MS, PB e EE, e redução no teor de MM ($p < 0,05$). Na CNF, não foi observado diferenças entre os tratamentos.

Tabela 8. Composição química da folha de mandioca do ensaio 2.

Ensaio 2					
	Conservação <i>In natura</i>	Conservação Desidratado	Média	EPM	P-valor
	MS g/kg		0,26	<0,01	<0,01 C x P 0,74
CP	282,0	791,5	536,8b		
SP	306,4	819,0	562,7a		
Média	294,2b	805,3a			
	MM g/kg		0,27	<0,01	<0,01 <0,01
CP	57,2b	64,7a	61,0		
SP	54,0c	55,4bc	54,7		
Média	55,6	60,0			
	PB g/kg		0,28	0,38	<0,01 0,27
CP	267,5	259,2	263,4b		
SP	287,5	288,5	288,0a		
Média	277,5	273,9			
	EE g/kg		0,27	<0,01	<0,01 0,20
CP	50,4	38,4	44,4b		
SP	56,8	51,1	53,9a		
Média	53,6a	44,7b			
	FDN g/kg		0,27	0,34	0,95 0,75
CP	395,4	403,6	399,5		
SP	397,0	401,3	399,1		
Média	396,2	402,4			
	FDA g/kg		0,27	<0,01	<0,01 0,38
CP	182,9	195,7	189,3a		
SP	145,0	163,6	154,3b		
Média	164,0b	179,7a			
	HEM g/kg		0,28	0,01	<0,01 0,46
CP	235,2	212,7	223,9b		
SP	252,1	238,1	245,1a		
Média	243,7a	225,4b			
	CNF g/kg		0,27	0,21	<0,01 0,56
CP	219,2	232,5	225,9a		
SP	197,5	202,5	200,0b		
Média	208,4	217,5			

CP – Com pecíolo; SP – Sem pecíolo; MS – Matéria seca; MM – Matéria mineral; PB – Proteína bruta; EE – Extrato Etéreo; FDN – Fibra em detergente neutro; CNF – Carboidratos não fibrosos; FDA – Fibra em detergente ácido; HEM – Hemicelulose

Tabela 9. Composição química da folha de mandioca do ensaio 3.

Ensaio 3						
	Conservação <i>In natura</i>	Conservação Desidratado	Média	EPM	P-valor	
	MS g/kg		0,33	<0,01	<0,01	0,18
CP	311,7	845,1	578,4b			
SP	337,9	885,7	611,8a			
Média	324,8b	865,4a				
	MM g/kg		0,27	<0,01	<0,01	0,80
CP	65,1	60,4	62,7a			
SP	52,6	47,2	49,9b			
Média	58,8a	53,8b				
	PB g/kg		0,28	0,15	0,01	0,85
CP	206,9	201,1	204,0b			
SP	220,3	212,9	216,6a			
Média	213,6	207,0				
	EE g/kg		0,31	<0,01	0,04	0,19
CP	48,4	36,2	42,3b			
SP	55,2	37,9	46,6a			
Média	51,9a	37,1b				
	FDN g/kg		0,26	<0,01	<0,01	0,01
CP	512,9a	501,7a	507,3			
SP	506,9a	477,7b	492,3			
Média	509,9	489,7				
	FDA g/kg		0,28	<0,01	<0,01	0,01
CP	234,2a	193,6b	213,9			
SP	188,7b	175,7b	182,2			
Média	211,4	184,6				
	HEM g/kg		0,30	0,20	<0,01	<0,01
CP	286,0b	308,1a	297,0			
SP	320,9a	308,3a	314,6			
Média	303,4	308,2				
	CNF g/kg		0,30	<0,01	0,72	0,16
CP	165,8	200,7	183,2			
SP	159,8	210,5	185,1			
Média	162,8b	205,6a				

CP – Com pecíolo; SP – Sem pecíolo; MS – Matéria seca; MM – Matéria mineral; PB – Proteína bruta; EE – Extrato Etéreo; FDN – Fibra em detergente neutro; CNF – Carboidratos não fibrosos; FDA – Fibra em detergente ácido; HEM – Hemicelulose

2.4 Discussão

2.4.1 Curvas de secagem

O modelo de Page demonstrou-se adequado para descrever o processo de secagem das folhas de mandioca, com ajustes considerados satisfatórios em todos os ensaios (Figura 5). Esse resultado corrobora com as observações realizadas por Modesto Júnior

et al. (2018b), que ao analisarem a cinética de secagem de folhas de mandioca em estufa, recomendaram o modelo de Page devido sua precisão e praticidade matemática.

De forma geral, em todos os ensaios as folhas apresentaram um comportamento semelhante durante o processo, caracterizado por uma acelerada perda de água inicial, tornando-se mais lenta com o passar do tempo. Esse comportamento é característico do período da taxa decrescente na secagem de produtos agrícolas (Silva *et al.*, 2008). Comportamento semelhante foi verificado na pesquisa de Chaiareekitwat *et al.* (2025), avaliando o comportamento da secagem em folhas de mandioca.

Essa perda de umidade inicial acelerada pode ser atribuída à evaporação da umidade superficial livre, enquanto a diminuição posterior está associada a remoção da água mais fortemente ligada ao interior da planta (Souza *et al.*, 2021).

As variações nos resultados de cada curva são esperadas no presente estudo, devido as condições experimentais serem diferentes em cada ensaio. A temperatura, umidade relativa e a velocidade do ar são fatores climáticos que afetam o processo de secagem de alimentos, resultando em secagens mais rápidas ou não (Silva, 2022; Reis *et al.*, 2015). Da mesma forma, os valores dos parâmetros obtidos pelas equações são influenciados pelas condições de secagem. O parâmetro “k” representa os efeitos da temperatura (Babalis & Belessiotis, 2004), enquanto o “n” é um coeficiente de ajuste que associa o tempo, permitindo que o modelo se adapte aos dados e corrija possíveis erros (Guedes & Faria, 2000; Page, 1949). Logo, o parâmetro “n” no modelo de Page também está relacionado com a resistência do material a secagem (Perez *et al.*, 2013).

As folhas no ensaio 1 apresentaram uma maior taxa de secagem (k). Esse resultado pode ser explicado pelas condições climáticas no período do ensaio, que foi realizado durante o período seco na região de Igarapé-Açu. Durante a realização do ensaio, foi possível observar temperatura média de 32°C e umidade relativa do ar variando entre 41% e 69% com média de 54%.

No ensaio 2, foi realizado no período de transição entre o final do período seco e o início do período do chuvoso, apresentando temperatura média de 32°C e umidade relativa do ar mínima, máxima e média, de 37%, 99% e 37%, respectivamente. Isso resultou em menor taxa de secagem e maior valor de “n” em relação aos demais ensaios, indicando uma dinâmica de secagem mais lenta, que pode ser explicada devido à presença de períodos chuvosos durante o ensaio. Apesar das condições climáticas não favoráveis para o processo, foi possível realizar a desidratação, parte por ocorrer dentro de casa de vegetação e outra devido ao aumento da temperatura nos dias finais. A casa de vegetação

era coberta por lona plástica transparente, promovendo cobertura e um efeito estufa (Reis *et al.*, 2005) durante o período.

No ensaio 3, apesar de os parâmetros de ajuste do modelo de Page apresentarem valores semelhantes entre os tratamentos, indicando taxas médias de secagem próximas, observa-se que os limbos foliares atingiram menores valores de relação de umidade em menor tempo, caracterizando um processo de desidratação mais rápido. Os pecíolos são componentes mais densos em comparações com as folhas, sua presença pode ter proporcionado barreiras físicas para circulação do ar, aumentando o tempo de secagem. Segundo Du e Liu (2025), densidades elevadas na forragem geram maior resistência à transferência tanto de massa quanto de calor. Isso dificulta a dissipação do calor gerado e, consequentemente, diminui a eficiência da secagem. Assim, embora o modelo matemático tenha indicado “k” semelhantes, o valor do parâmetro “n” diferentes entre os fatores, sugere que a presença do pecíolo promoveu maior desaceleração da taxa de secagem, enquanto a ausência favoreceu a remoção mais rápida da umidade, especialmente nas fases iniciais do processo.

Regiões com alta umidade apresentam uma taxa de secagem lenta, no entanto, a umidade relativa tem um efeito insignificante sobre a taxa de secagem em dias ensolarados com umidade relativa <60% (Zamudio *et al.*, 2024). Esse fato corrobora com os resultados da pesquisa.

2.4.2 Composição Química

De forma geral, o teor de MS do material atingiu o valor recomendado para alimentos desidratados (em torno de 80%), indicando que o processo de secagem foi eficiente. Esse comportamento é esperado, e pode ser observado em outros trabalhos, como de Schneider *et al.* (2024 a) avaliando alterações na composição química do feno de aveia branca. Além disso, notou-se que a retirada dos pecíolos proporcionou um aumento nesse teor, indicando uma secagem mais eficiente. O pecíolo retém mais umidade que o limbo foliar (Idris *et al.*, 2021), pois estruturas com tecido de sustentação, como os pecíolos, tendem a apresentar maior resistência na perda de água em relação a folhas (Bayão *et al.*, 2016).

A matéria mineral (MM) apresentou efeito de interação no ensaio 2, constatando que a desidratação depende do fator pecíolo, embora, os efeitos variem entre os ensaios 1 e 3. As variações na concentração desse componente podem estar relacionadas a

diversos fatores, como a contaminação externa, problemática comumente observada quando a desidratação ocorre em ambiente aberto (Nainggolan, Banout, Urbanova, 2024).

A concentração de proteína bruta (PB) teve influência maior com a retirada dos pecíolos, no entanto, no ensaio 1 observou-se diminuição após a desidratação. Alguns fatores podem influenciar na diminuição de PB durante a secagem, entre elas degradação térmica e lixiviação (Duan *et al.*, 2014). O aumento na concentração de PB nas folhas sem pecíolo sugere que o limbo foliar contém uma quantidade maior de proteína do que os pecíolos. Ao remover o pecíolo, que é uma parte da planta com menor valor nutricional, a concentração de proteína aumenta. Essa observação é consistente com outros estudos, como os de Idris *et al.* (2021) e Vivasane *et al.* (2017), que também verificaram maiores teores de proteína em limbos foliares em comparação aos pecíolos.

O teor de EE nas folhas desidratadas foi menor do que na amostra *in natura*, esse resultado pode estar relacionado à perda de compostos voláteis, durante a secagem, assim como foi observado em folhas de amora (Li *et al.*, 2023). A degradação de pigmentos presentes na fração do EE durante a secagem, como a clorofila, também pode influenciar nessa quantidade (Chaiareekitwat *et al.*, 2025). Já em relação ao pecíolo, a retirada proporcionou um aumento, que pode ser associada a maior teor de gordura nas folhas, como foi observado por Idris *et al.*, (2020), em comparação a outros componentes da mandioca.

Em relação ao FDN, observou-se interação dos fatores no ensaio 3, enquanto no ensaio 1, verificou apenas efeito do pecíolo. A secagem diminui a concentração de água, podendo provocar alterações na composição química. Bueno *et al.* (2017) em seu estudo observaram um aumento no teor de FDN e outros componentes em quatro gramíneas após a secagem. Esse fato aliado a maior concentração de FDN nos pecíolos (Sath *et al.*, 2012), corroboram com o resultado.

O FDA apresentou diminuição com a retirada dos pecíolos. O pecíolo é um componente da planta com elevado teor de fibras, devido sua estrutura ser predominantemente por tecidos de sustentação (Idris *et al.*, 2021; Ribeiro *et al.*, 2016). Logo, em sua composição pode se observar teores de FDA maior do que o das folhas (Sath *et al.*, 2012). Consequentemente, sua retirada contribui para redução na concentração.

A retirada dos pecíolos aumentou o teor de HEM. Os limbos foliares geralmente possuem maior proporção de hemicelulose em relação à celulose e lignina, enquanto estruturas de sustentação tendem a ter mais lignina e celulose (Rueda *et al.*, 2020). Ao

remover o pecíolo, o produto passa a conter mais tecido foliar, elevando proporcionalmente o teor de hemicelulose. A desidratação apresentou efeito variável, sendo observado, principalmente, diminuição na HEM. Uma possível explicação pode estar associada a vulnerabilidade a degradação térmica desse componente (Yeo *et al.*, 2019).

O processo de desidratação resultou em aumento nos teores de CNF, possivelmente em função do efeito de concentração na MS. No ensaio 2, a presença do pecíolo resultou em maior concentração de CNF, o que pode estar associado à sua composição anatômica. Apesar de apresentar maior teor de fibras (FDN), o pecíolo contém tecidos de reserva e condução que concentram carboidratos solúveis, os quais podem ter contribuído para o aumento dessa fração (Spicer, 2014).

2.5 Conclusão

A desidratação da folha de mandioca é influenciada pela temperatura e umidade, podendo ser realizada nos meses de julho, outubro e dezembro, com maior eficiência em outubro, quando a secagem ocorre em cerca de 27 horas de exposição solar (três dias). A remoção do pecíolo reduz o tempo de secagem em aproximadamente 10 horas e eleva o teor de proteína bruta em cerca de 18,3 g/kg. As folhas desidratadas mantêm boa conservação de nutrientes, resultando em farelo com alto teor proteico (200–290 g/kg MS). Em regiões tropicais úmidas, a secagem é viável em períodos de alta temperatura e umidade entre 40% e 70%, permitindo o uso do produto em rações para pequenos e médios produtores.

2.6 Referências bibliográficas

- ALMEIDA, J.; FERREIRA FILHO, J. **Mandioca: uma boa alternativa para alimentação animal.** 2005.
- BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.449-458, 2004.
- BAYÃO, G.F.V. *et al.* Desidratação e composição química do feno de Leucena (Leucena leucocephala) e Gliricidia (Gliricidia sepium). **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 17, p. 365-373, 2016.
- BUENO, A.V. I. *et al.* Método de obtenção de matéria seca e composição química de volumosos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 18, p. e44913, 2017.

CELESTINO, S.M.C. **Princípios de secagem de alimentos.** 2010.

CHIAAREKITWAT, S. *et al.* Drying behavior and effect of drying temperatures on cyanide, bioactive compounds, and quality of dried cassava leaves. **Applied Sciences**, Basel, v. 15, n. 5, p. 2680, 2025.

DA SILVA, Á. C. *et al.* Utilização da raiz de mandioca desidratada, em substituição ao milho, na suplementação de vacas holandesas em pastejo sobre o consumo voluntário, digestibilidade aparente e metabolismo energético. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3Sup11, p. 2259-2274, 2015.

DETMANN, E., et al., **Métodos para análise de alimentos.** 2 ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2021. 350p.

DU, J.; LIU, C. Experimental Study on Drying Characteristics of Alfalfa Hay Bales Using Hot Air Convection. **Applied Sciences**, v. 15, n. 7, p. 3921, 2025.

DUAN, Xu *et al.* The influences of drying process on crude protein content of naked oat cut herbage (*Avena nuda* L.). **Drying Technology**, v. 32, n. 3, p. 321-327, 2014.

EVANGELISTA, A.R.; LIMA, J. A. Produção de feno. **Informe Agropecuário**, v. 34, n. 277, p. 43-52, 2013.

FERNANDES, F.D. *et al.* Composição química de silagem e feno da parte aérea e da raspa de raízes de mandioca. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 16, n. 44, p. 1231-1249, 2023.

FLUCK, A. C. *et al.* Alimentos alternativos na alimentação de ruminantes. In: EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL (Org.). **Zootecnia: tópicos atuais em pesquisa - Volume 2**. Editora Científica Digital, 2023. p. 12-31. DOI: 10.37885/230211916. Disponível em: [ALIMENTOS ALTERNATIVOS NA ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES](#). Acesso em: 28 de dez. de 2024.

GUEDES, A.M.M.; FARIA, L.J.G. Determinação da constante de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.) em secador convectivo de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 73-86, 2000.

IDRIS, S.B. *et al.* Proximate composition of different parts of white cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plant as a ruminant feed. **Advances in agricultural and food research journal**, v. 2, n. 1, 2021.

IHEDIWA, Victor Ejikeme et al. Thermal dehydration of some forage grasses for livestock feeding: Effect of different methods on moisture diffusivity and the quality of dried leaves. **Energy Nexus**, v. 8, p. 100156, 2022.

LI, H. *et al.* Effects of Different Drying Processes on Bioactive Components, Volatile Compounds, and In Vitro Inhibition of Starch Digestion in Mulberry Leaf Extracts. **Foods**, v. 14, n. 6, p. 998, 2025.

MAGALHÃES, A. L. R *et al.* Composição química, fracionamento de carboidratos e compostos nitrogenados, cinética da degradação ruminal e produção de gas in vitro de genótipos de palma forrageira. **Ciência Animal Brasileira**, v. 22, 2021.

MELESSE, A.; MASEBO, M.; ABEBE, A. The substitution effect of noug seed (*Guizotia abyssinica*) cake with cassava leaf (*Manihot escululata* C.) Meal on feed intake, growth performance, and carcass traits in broiler chickens. **J. Anim. Hus. Dairy Sci**, v. 2, p. 1-9, 2018.

MIDILLI, ADNAN; KUCUK, HAYDAR; YAPAR, Z.İ. YA. A new model for single-layer drying. *Drying Technology: An International Journal*, v. 20, n. 7, pág. 1503-1513, 2002.

MODESTO JUNIOR, E. N. *et al.* Cinética de secagem das folhas de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), 2018b.

MODESTO JUNIOR, E.N. *et al.* Caracterização Físico-Química e Determinação de Ácido Cianídrico em Folhas de Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). In: **XXVI Congresso Brasileiro de Ciência dos Alimentos**, 2018a.

MODESTO, E.C. *et al.* Composição química das folhas de cinco cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz.) em diferentes épocas de colheita. **Reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia**, v. 38, p. 1033-1034, 2001.

MOTA, D. *et al.* Perfil de fermentação e perdas na ensilagem de diferentes frações da parte aérea de quatro variedades de mandioca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 7, p. 1466-1473, jul. 2011.

MÜHLBAUER, W.; MÜLLER, J. Drying kinetics. **Drying Atlas**, p. 53-61, 2020.

NAINGGOLAN, E. A.; BANOUT, J.; URBANOVA, K. Recent trends in the pre-drying, drying, and post-drying processes for cassava tuber: a review. **Foods**, v. 13, n. 11, p. 1778, 2024.

OLIVEIRA, J. S. *et al.* Como medir a matéria seca (MS%) em forragem utilizando forno de micro-ondas. EMBRAPA: **Comunicado técnico 77**, 2015.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of food engineering**, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.

PEREZ, L.G. *et al.* Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 102-106, 2013.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engineering in Agriculture**, v.19, n.1, p. 19-27, 2011.

REIS, D.R. *et al.* Influência das características do ar na cinética de secagem de pimenta variedade bico. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 18, n. 2, p. 146-154, abr./jun. 2015.

RIBEIRO, D.G.; HASHIMOTO-FREITAS, D. Y.; NASSAR, N. M. A. Comparative petiole anatomy of cassava (*Manihot*) species. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 1, p. 1-13, 2016.

RUEDA, J. A. *et al.* Morphological composition and fiber partitioning along regrowth in elephant grass CT115 intended for ethanol production. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 15118, 2020.

SATH, K. *et al.* Feed intake, digestibility, and N retention in cattle fed rice straw and para grass combined with different levels of protein derived from cassava foliage. **Asian-Australasian journal of animal sciences**, v. 25, n. 7, p. 956, 2012.

SCHNEIDER, C. R. *et al.* Alterações no valor nutricional do feno de aveia branca na desidratação e armazenamento. **Observatorio de la economía latinoamericana**, v. 22, n. 7, p. e5655-e5655, 2024.

SILVA, J.F.S. *et al.* The replacement of grass hay by cassava foliage hay or spineless cactus improves lamb performance. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, p. 1623-1630, 2020.

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

SNIFFEN CJ, O'C. JD, Van Soest PJ. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *J. Anim. Sci.* 1992; 70(11):3562-3577. Disponível em: <https://doi.org/10.2527/1992.70113562x>

SOUZA, T.L. *et al.* Processo de secagem solar e transferência de massa em amostras de mandioca. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 86647-86657, 2020.

SPICER, R. Symplasmic networks in secondary vascular tissues: parenchyma distribution and activity supporting long-distance transport. **Journal of experimental botany**, v. 65, n. 7, p. 1829-1848, 2014.

VIVASANE, Souksakhone; DO, Ho Quang; PRESTON, T. R. Effect of different harvesting intervals on foliage yield and chemical composition of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Livestock Research for Rural Development**, v. 29, 2017.

YEO, J.Y. Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, n. 1, p. 27-37, 2019.

ZAMUDIO, D. *et al.* Factors affecting nutrient losses in hay production. **Grass and Forage Science**, v. 79, n. 4, p. 499-515, 2024.

Capítulo III – Dinâmica de secagem da casca de mandioca para uso na alimentação animal

RESUMO

A casca de mandioca é um derivado oriundo do processamento das raízes, considerada uma alternativa energética na alimentação animal, podendo substituir alimentos convencionais como o milho. Objetivou-se com esse estudo caracterizar o processo de secagem natural da casca de mandioca e definir o tempo mínimo de secagem. O experimento foi conduzido no município de Igarapé-Açu (PA), dividido em três ensaios realizados nos meses de outubro e dezembro de 2023 e julho de 2024. As cascas de mandioca foram dispostas em parcelas independentes sobre lona plástica preta e expostas diretamente à secagem solar. Na predição das curvas de secagem, foram analisados quatro modelos matemáticos: Lewis (ou Newton), Page, Henderson e Pabis, e Midilli. Os critérios de seleção para o melhor modelo incluíram o coeficiente de determinação (R^2), o qui-quadrado reduzido (χ^2) e o erro quadrático médio da estimativa (RMSE). O modelo de Page ($R^2 > 0,95$, $RMSE < 0,07$, $\chi^2 < 0,005$) mostrou-se eficiente para predizer a secagem da casca de mandioca nos três ensaios. Em todas as curvas ajustadas os coeficientes de determinação foram elevados ($R^2 > 0,94$). No ensaio 1, os parâmetros do modelo foram $k=0,0246$ e $n=1,2836$. A análise dos dados do ensaio 2 apresentou a maior taxa de secagem ($k=0,0282$) e menor n (1,0198) entre os ensaios, no entanto, a curva não acompanhou os tempos finais. No ensaio 3 a taxa de secagem (k) foi de 0,0119 e o parâmetro “n” de 1,5448. No geral, todas as curvas apresentaram comportamento característico do processo de secagem. Em relação a composição química, a desidratação apresentou efeito em todas as variáveis, alterando entre os ensaios, exceto nos teores de PB. A desidratação da casca de mandioca aumentou os teores de MS, tornando o processo eficiente. Os teores de MM e de EE diminuíram, possivelmente devido à perda de partículas finas e compostos voláteis. Os teores de FDN, FDA e HEM variaram, refletindo a solubilização ou a concentração de componentes da fibra. A variabilidade dos resultados pode ser atribuída a fatores ambientais, ao processo de secagem e à composição original do material. A secagem solar da casca de mandioca para produção de farelo é tecnicamente viável em climas tropicais úmidos, desde que sejam garantidas condições ambientais específicas. O processo é mais eficiente com altas temperaturas e umidade relativa baixa a moderada (40% a 70%), permitindo a conclusão da secagem em cerca de cinco dias. A adequada preservação da composição química das cascas desidratadas as estabelece como uma opção viável e de valor para formulações de dietas para animais.

Palavras- chave: curvas de secagem, desidratação, umidade.

ABSTRACT

Cassava peel is a by-product generated during root processing and is considered an alternative energy source in animal feeding, with potential to replace conventional ingredients such as corn. This study aimed to characterize the natural drying process of cassava peel and determine the minimum drying time required. The experiment was conducted in the municipality of Igarapé-Açu, Pará (Brazil), and was divided into three trials carried out in October and December 2023 and July 2024. Cassava peels were arranged in independent plots on black plastic tarps and exposed directly to sunlight. Four mathematical models were evaluated for predicting drying curves: Lewis (or Newton), Page, Henderson and Pabis, and Midilli. Model selection criteria included the coefficient of determination (R^2), reduced chi-square (χ^2), and root mean square error (RMSE). The Page model ($R^2 > 0.95$, $RMSE < 0.07$, $\chi^2 < 0.005$) was the most efficient for predicting the drying behavior of cassava peel across all three trials. All fitted curves exhibited high determination coefficients ($R^2 > 0.94$). In trial 1, the model parameters were $k = 0.0246$ and $n = 1.2836$. Trial 2 showed the highest drying rate ($k = 0.0282$) and the lowest n value (1.0198) among the trials; however, the fitted curve did not accurately follow the final drying times. In trial 3, the drying rate (k) was 0.0119 and the “ n ” parameter was 1.5448. Overall, all drying curves showed characteristic behavior expected for the dehydration process. Regarding chemical composition, dehydration affected all variables across the trials, except crude protein content. Dehydration increased dry matter content, confirming the efficiency of the process. Ash and ether extract contents decreased, possibly due to the loss of fine particles and volatile compounds. NDF, ADF, and hemicellulose levels varied, reflecting the solubilization or concentration of fiber components. The variability observed among trials may be associated with environmental conditions, drying dynamics, and the original composition of the material. Solar drying of cassava peel for meal production is technically feasible in humid tropical climates, provided that specific environmental conditions are met. The process is most efficient under high temperatures and moderate to low relative humidity (40% to 70%), allowing drying to be completed in approximately five days. Proper preservation of the chemical composition of the dehydrated peel establishes it as a viable and valuable option for animal diet formulation.

Keywords: drying curves, dehydration, moisture.

3.1 Introdução

A mandioca é uma cultura de importância socioeconômica em escala global. Em 2023, sua produção mundial alcançou 333 milhões de toneladas, com destaque para os países como Nigéria, República Democrática do Congo, Tailândia, Gana e Brasil (FAO, 2023). A raiz da mandioca é amplamente consumida pela população desses e de outros países produtores, apresentando grande versatilidade em seu preparo, como em sua forma cozida, frita, farinha e fécula, e como insumo de indústrias (Felipe, Alves e Camargo, 2010).

Durante o processamento da raiz de mandioca para fabricação de alimentos, a casca é gerada como derivado na etapa inicial. Este derivado, considerado o principal do processamento da mandioca, é composto pela ponta, entrecasca e casca externa, representando aproximadamente 5% do peso total das raízes (Dourado *et al.*, 2020; Santana *et al.*, 2014).

A casca de mandioca pode ser utilizada na alimentação animal como fonte de energia devido a sua concentração de amido que podem atingir em torno de 60% (Souto *et al.*, 2016). Além disso, em sua composição química podemos observar valores em torno de 32% de matéria seca, 4% de proteína bruta e 20% de fibra em detergente neutro (Ferreira *et al.*, 2007). No entanto, por se tratar de um derivado de agroindústria, sua composição pode variar conforme a variedade, idade de colheita e método de processamento.

O elevado teor de umidade presente nas cascas de mandioca pode prejudicar seu armazenamento e consequentemente, sua qualidade nutricional. Diante disso, a secagem surge como uma alternativa viável na conservação dos nutrientes e facilitar seu uso (Vilhalva *et al.*, 2012). Esse processo pode ser realizado de forma natural em regiões de clima tropical, sendo considerado de baixo custo, por necessitar apenas de espalhar o material sobre um local e expor ao sol (Celestino, 2010; Silva *et al.*, 2008). O uso da casca de mandioca desidratada na alimentação animal tem demonstrado resultados satisfatórios, tanto em relação ao consumo e digestibilidade dos nutrientes quanto aos aspectos econômicos (Santos *et al.*, 2015; Ojediran *et al.*, 2024).

Em regiões de clima tropical úmido, um dos maiores desafios para a produção de fenos é a elevada umidade relativa do ar, que pode comprometer o tempo de secagem no campo e o armazenamento (Ramos *et al.*, 2020; Ihediwa *et al.*, 2022). Entretanto, dependendo da época do ano, esse processo pode ser realizado, porém, é necessário a

realização de estudos específicos para região, para possibilitar uma padronização do processo.

Diante desse contexto, a utilização da casca de mandioca desidratada por meio da secagem natural na alimentação animal apresenta-se como uma estratégia sustentável e de baixo custo. Dessa forma, objetivou-se com esse estudo caracterizar o processo de secagem natural da casca de mandioca em três ensaios conduzidos em diferentes épocas e definir o tempo mínimo de secagem em diferentes períodos do ano.

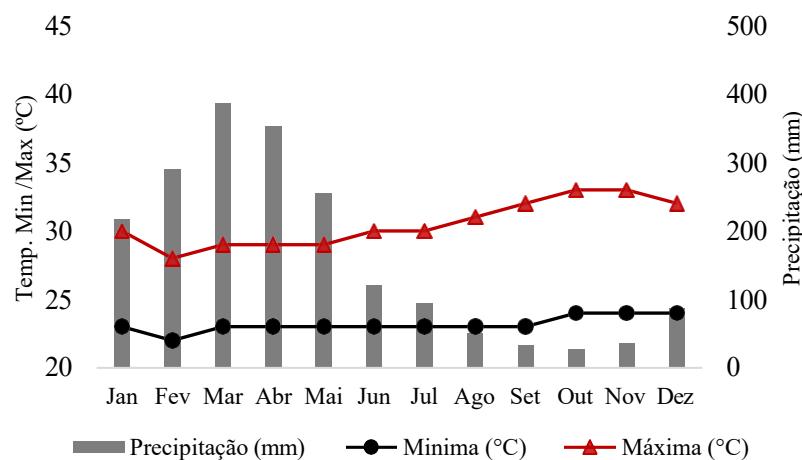
3.2 Material e métodos

3.2.1 Localização

O experimento de campo foi realizado na Fazenda Escola de Igarapé-Açu (FEIGA) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizada no município de Igarapé-açu ($1^{\circ}07'41''$ S, $47^{\circ}36'30''$ W, 53 m de altitude).

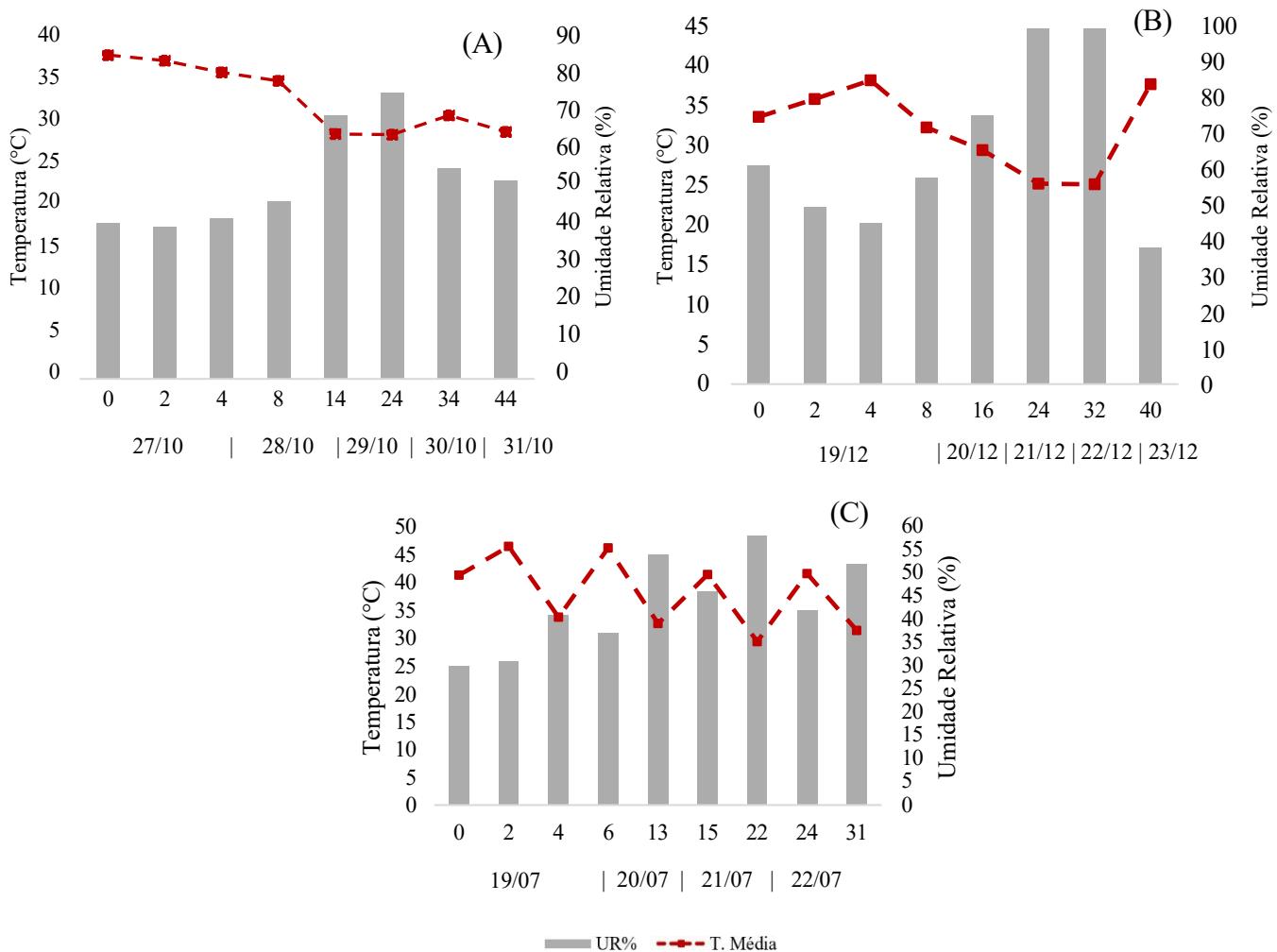
O município de Igarapé-açu encontra-se na região Nordeste do Pará, possuindo predominância do tipo climático “Ami”, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por clima chuvoso com pequena estação seca (Bastos e Pacheco, 2011). Em relação as características agrometeorológicas, ao longo do ano o município apresenta temperaturas variando entre 23° e 31° , precipitação média de 162 mm (Figura 6) e, umidade relativa do ar em média de 79% (ClimaTempo, 2024; INMET, 2024). Na figura 7, observa-se dados de temperatura e umidade durante os ensaios.

Figura 6. Comportamento da chuva e temperatura de Igarapé-Açu.



Fonte: ClimaTempo (2024)

Figura 7. Comportamento da umidade e temperatura de Igarapé-Açu durante o ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e ensaio 3 (C).



3.2.2 Procedimentos experimentais

Foram conduzidos três ensaios para avaliar o processo de desidratação, sendo as cascas de mandiocas utilizadas no experimento oriundas de agroindústria e estavam armazenadas em sacos de 35 kg. As unidades experimentais consistiram em parcelas independentes, medindo 1 m², dispostas sobre uma lona plástica preta posicionada no solo. Cada parcela foi composta por aproximadamente 20 kg de casca, distribuídas em uma camada de cerca de 4 cm de espessura. Nos ensaios foram utilizadas 10 repetições.

Em todos os ensaios foram definidos intervalos de amostragem para o ajuste das curvas de desidratação. Em cada tempo de coleta, retiraram-se aproximadamente 400 g de material, que foram utilizados para a determinação da matéria seca e demais análises. Os períodos de secagem foram conduzidos das 8h às 17h em todos os ensaios.

O primeiro ensaio (E1) foi realizado no mês de outubro de 2023, no qual foi avaliado oito tempos de exposição ao sol (0, 2, 4, 8, 14, 24, 34 a 44 horas). O segundo ensaio (E2) realizou-se no mês de dezembro de 2023, sendo avaliados oito tempos de desidratação (0, 2, 4, 8, 16, 24, 32 e 40 horas). Devido as condições climáticas da época, este segundo ensaio foi conduzido dentro de casa de vegetação. O último ensaio (E3) foi conduzido no mês de julho de 2024, e foram avaliados nove tempos de exposição (0, 2, 4, 6, 13, 15, 22, 24 e 31 horas).

3.2.2.1 Procedimentos durante a secagem

Para se obter os dados de temperatura e umidade relativa do ar, foi utilizado um termo-higrômetro com sensor (EOS DTH-2), sendo realizada de 1 a 2 coletas de dados por dia. Além disso, as cascas eram revolvidas duas vezes ao dia, uma pela manhã e outra à tarde. Às 17 horas, após a última coleta de amostra do dia, o material era coberto com lona plástica preta.

A partir do segundo dia, no final da tarde, uma amostra de aproximadamente 50 gramas, foi coletada das repetições para determinar os teores de matéria seca pelo método do micro-ondas (Oliveira *et al.*, 2015). A desidratação foi encerrada quando o material atingia de 10 a 20% de umidade. Após o término da desidratação e a coleta da última amostragem, as cascas restantes foram coletadas da lona e trituradas em um triturador forrageiro, com peneira de tamanho 0,8 mm e armazenadas em sacos de polietileno.

3.2.3 Análises de laboratório

As análises de laboratório foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal (LABNUTAN), localizado no setor da Zootecnia da Universidade Federal Rural da Amazônia – Belém.

3.2.3.1 Determinação de matéria seca (MS)

Para a determinação dos teores de matéria seca para a elaboração das curvas de desidratação, foram coletadas aproximadamente 400 gramas, em cada tempo de desidratação, e congelados a -20°C para posterior análises. Após serem descongeladas em temperatura ambiente, foram pesadas e submetidas à pré-secagem em estufa de circulação forçada de ar por 72h a 55°C, sendo posteriormente moídas em moinho de faca tipo Willey, com peneira com crivo de 1 mm de diâmetro. Após esse processo, para determinar os teores de matéria seca (MS), usou-se o método INCT G-003/1 (Detmann *et al.*, 2021), no qual pesasse aproximadamente 2 gramas da amostra moída e submete a uma estufa de

secagem definitiva a 105°C por 16 horas. Após esses procedimentos, é calculado os teores de matéria seca.

3.2.3.2 Composição química

A determinação da composição química foi realizada apenas no tempo inicial (*in natura*) e tempos finais (desidratados) de cada ensaio (31, 40 e 44 horas). Além da determinação dos teores de matéria seca descritos anteriormente, analisou-se a matéria mineral (MM) em forno mufla a 550°C por 3 horas (método INCT M- 001/2). A concentração de proteína bruta (PB) determinada pelo método Kjeldahl (método INCT-N-001/2). O extrato etéreo (EE) (método INCT G-004/1). Os teores de fibra em detergente neutro (FDN) (método INCT F-002/1), fibra em detergente ácido (FDA) (método INCT- F-004/2) e a hemicelulose calculada pela diferença entre FDN e FDA. E os carboidratos não fibrosos (CNF) calculados conforme a seguinte fórmula: CNF = 100 – (PB + EE + FDN + MM). Todas as análises foram realizadas conforme Detmann *et al.*, 2021.

3.2.4 Relação de umidade (RU)

Para o ajuste dos dados aos modelos matemáticos, os valores de umidade foram expressos na forma de relação de umidade (RU), utilizando-se a equação descrita por Mühlbauer e Müller (2020):

$$RU = \frac{U(t) - U_e}{U_1 - U_e}$$

Onde:

RU = Relação de umidade (adimensional)

U (t) = Umidade no tempo

U₁ = Umidade inicial

U_e = Umidade de equilíbrio

3.2.5 Análise estatística

3.2.5.1 Curvas de secagem

Os dados de cinética de secagem foram analisados por meio do ajuste dos valores de umidade expressos tanto em porcentagem quanto em relação de umidade (RU), utilizando o software RStudio.

A cinética de secagem baseada na umidade em porcentagem foi modelada por regressão não linear, utilizando a seguinte equação exponencial:

$$\text{Umidade} = a \cdot e^{-b \cdot \text{horas}}$$

Onde:

a = Umidade inicial,

b = Constante de taxa do decaimento exponencial.

Estimativas iniciais dos parâmetros para a foram definidas com base em valores iniciais para cada ensaio, e b como 0,01.

Para as previsões das curvas de secagem expressas em relação de umidade, foram avaliados os ajustes em quatro modelos matemáticos semiempíricos, comumente utilizados para descrever a cinética de secagem em camada fina de produtos agrícolas (Tabela 10).

Tabela 10. Modelos matemáticos utilizados nos ajustes dos dados de RU.

Modelo matemático	Equação*
Lewis/Newton	$\text{RU} = \exp(-k \cdot t)$
Page	$\text{RU} = \exp(-k \cdot t^n)$
Henderson e Pabis	$\text{RU} = A \cdot \exp(-k \cdot t)$
Midilli	$\text{RU} = A \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

k – Constante de secagem; A , b , n – Coeficiente do modelo; t – Tempo (horas)

*Mühlbauer e Müller (2020); Midilli, Kucuk, Yapar (2002); Radünz *et al.* (2011)

Os ajustes foram realizados por meio da função `nls_multstart` do pacote `nls_multstart` da linguagem R, a qual permite múltiplas tentativas de estimativas iniciais, favorecendo a convergência dos parâmetros.

Como critérios de seleção do modelo foram considerados os valores do coeficiente de determinação (R^2), do qui-quadrado reduzido (χ^2) e do erro quadrático médio da estimativa (RMSE), a fim de avaliar a qualidade dos ajustes realizados.

Tanto para a variável umidade quanto relação de umidade, as medidas ao longo do tempo foram tomadas na mesma unidade experimental. Isso indica possível

autocorrelação entre as observações ao longo do tempo. Portanto, os modelos escolhidos foram novamente ajustados considerando possíveis estruturas de correlação e heterogeneidade dos erros. Para isso, utilizou-se a função `gnls` do pacote `nlme` na linguagem R, permitindo o ajuste de modelos não lineares generalizados com estruturas específicas para os erros.

Foram testadas diferentes combinações entre estruturas de covariância (independência, autocorrelação de primeira ordem - AR (1), autocorrelação contínua - CAR (1), e modelo autorregressivo-médias móveis - ARMA (1,1)) e modelos de heterocedasticidade (variância constante, exponencial - `varExp`, potência - `varPower` e variância distinta por tempo - `varIdent`).

Diante disso, foram testados 16 modelos de regressão não linear, considerando as combinações. A seleção do modelo foi baseada no critério de informação de Akaike (AIC), sendo escolhido o com menor valor de AIC (Tabela 11). Q-Q plots e teste de normalidade de Shapiro-Wilk, além da obtenção do coeficiente de determinação (R^2) entre os valores ajustados e observados.

Tabela 11. Modelos de regressão não linear selecionados por ensaio.

Ensaio	Modelo de covariância e heterocedasticidade
1	AR1_varExp
2	CAR1_varExp
3	CAR1_varExp

3.2.5.2 Composição química

Para a composição química, foi utilizado o Delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando o procedimento GLIMMIX no SAS (SAS OnDemand for Academics), para testar os efeitos da conservação (*in natura* e desidratado). As médias foram comparadas por meio do teste de “Tukey”, considerando 0,05 como nível de significância do erro tipo I ($p<0.05$). A normalidade dos resíduos foi verificada pelo procedimento UNIVARIATE, com base no teste de Shapiro-Wilk.

$$Y_{ij} = \mu + C_i + \varepsilon_{ij}$$

Onde:

Y_{ij} = observação da variável de composição química na i -ésima conservação ($i = 1$: *in natura*, 2: desidratado) e j -ésima repetição;

μ = média geral;

C_i = efeito fixo do i -ésimo nível de conservação;

ε_{ij} = erro aleatório associado ao valor observado.

3.3 Resultados

3.3.1 Curvas de secagem

Na tabela 12, são apresentados os valores das métricas de seleção para o ajuste dos modelos matemáticos, para cada ensaio de desidratação das cascas de mandioca. Observa-se que os modelos matemáticos analisados apresentaram ajustes dentro da faixa ideal para o coeficiente de determinação ($R^2 > 0,90$), porém, além do R^2 deve ser considerada a avaliação de outras métricas da qualidade dos ajustes (Mamdamba, Driscoll e Buckle ,1996). Neste caso, a análise dos valores de RMSE ($< 0,1$) e do χ^2 ($< 0,01$), confirma a precisão dos modelos para predizer a cinética de secagem da casca, por estarem mais próximos de 0 (Panchariya, Popovic e Sharma, 2002).

Entre os modelos analisados, os que apresentaram as melhores métricas foram o de Midilli ($R^2 > 0,98$, RMSE $< 0,04$, $\chi^2 < 0,002$) e o de Page ($R^2 > 0,95$, RMSE $< 0,07$, $\chi^2 < 0,005$) para todos os ensaios. Buscando-se a simplificação na simulação do processo de secagem, optou-se o uso do modelo de Page, devido a sua menor quantidade de parâmetros em comparação ao de Midilli.

Tabela 12. Valores dos parâmetros de seleção calculados para verificação dos ajustes dos modelos matemáticos.

Modelos	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0,973	0,059	0,004	0,912	0,102	0,011	0,930	0,092	0,009
Page	0,984	0,045	0,002	0,958	0,071	0,005	0,984	0,044	0,002
Henderson e Pabis	0,975	0,056	0,003	0,917	0,099	0,010	0,943	0,083	0,007
Midilli	0,986	0,043	0,002	0,989	0,036	0,001	0,989	0,037	0,002

Na figura 8, observa-se o comportamento da umidade das cascas de mandioca para cada ensaio em porcentagem de umidade. Considerando as curvas de umidade (%), observa-se que os teores de umidade inicial das cascas para o ensaio 1 e 2 foram de aproximadamente 63% (Figura 8 A e B, respectivamente). Já o ensaio 3, iniciou com o maior teor de umidade, cerca de 68% (Figura 8 C). Ao final da desidratação, as cascas do ensaio 1 apresentaram uma umidade final de cerca de 9% após 44 horas de processo. O

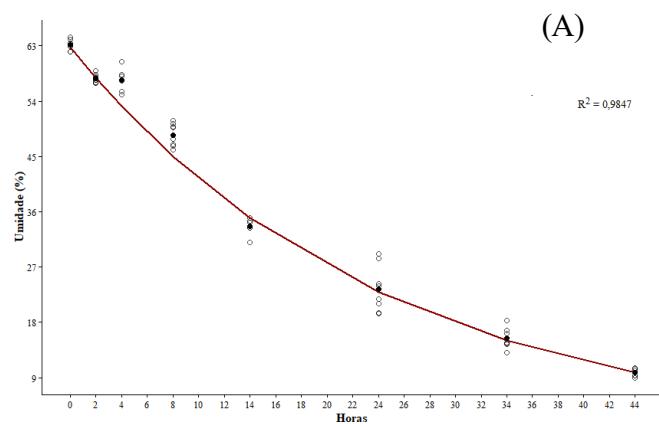
ensaio 2 resultou em uma umidade final de 14% após 40 horas de desidratação, enquanto o ensaio 3 finalizou com aproximadamente 11% de umidade após 31 horas.

Na figura 9 apresenta-se as curvas de secagem com os dados convertidos para o parâmetro relação de umidade ajustadas ao modelo de Page. Verifica-se que, em todos os ensaios, as curvas de secagem apresentam um comportamento de perda de água característico do processo, com uma queda acentuada no início que desacelera ao longo do tempo.

No ensaio 1 (Figura 9 A), observa-se um adequado ajuste do modelo para a descrição do processo de secagem, apresentando um $R^2=0,9891$ e a equação ajustada sendo: $RU=e^{-(0.0246) \times \text{Horas}^{1.2839}}$. Com relação ao ensaio 2, o modelo de Page apresentou um ajuste satisfatório ($R^2=0,9447$), no entanto, nota-se que a curva ajustada não acompanhou com precisão a perda de umidade na fase final. Dessa forma, a seguinte equação ajustada foi obtida: $RU=e^{-(0.0282) \times \text{Horas}^{1.0198}}$ (Figura 9 B). No ensaio 3, o modelo foi capaz de predizer com precisão as perdas de umidade em função do tempo, apresentando um $R^2=0,9861$, obtendo a seguinte equação ajustada: $RU=e^{-(0.0119) \times \text{Horas}^{1.5448}}$ (Figura 9 C).

Através das equações ajustadas obtidas pelo modelo de Page, foram extraídos parâmetros que contribuem para o entendimento da cinética de secagem das cascas de mandioca (Tabela 13). No Ensaio 1, os parâmetros encontrados foram $k=0,0246$ e $n=1,2836$. No Ensaio 2, os parâmetros obtidos foram $k=0,0282$ e $n=1,0198$. O ensaio 3 apresentou a menor taxa de secagem ($k=0,0119$) e o maior valor de n (1,5448).

Figura 8. Curvas de umidades elaboradas por regressão não linear da casca de mandioca para ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e ensaio 3 (C).



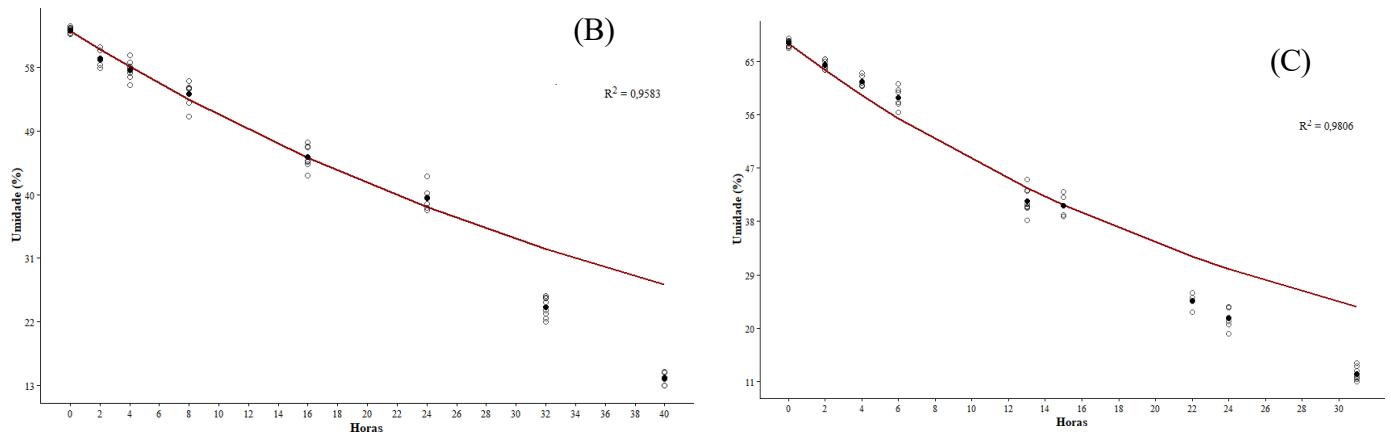


Figura 9. Curvas de secagem preditas pelo modelo de Page com dados ajustados, para secagem de casca de mandioca para ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e ensaio 3 (C).

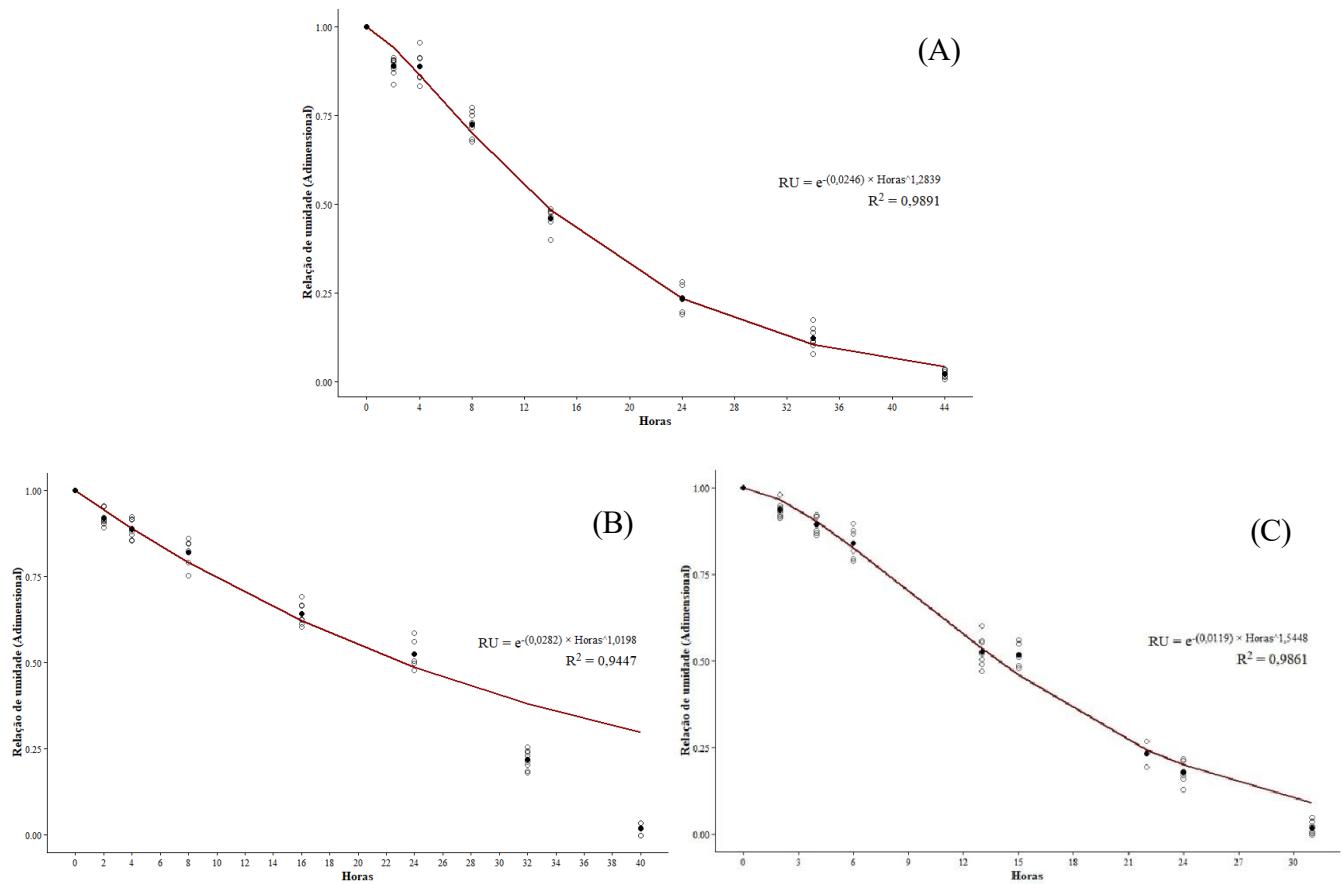


Tabela 13. Parâmetros obtidos dos modelos ajustados aos dados de secagem de casca de mandioca para cada ensaio.

Modelo	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	k	n	R ²	k	n	R ²	k	n	R ²
Page	0,0246	1,2836	0,9891	0,0282	1,0198	0,9447	0,0119	1,5448	0,9861

3.3.2 Composição química

No ensaio 1, houve efeito da desidratação sobre a maioria das variáveis ($p<0,05$) exceto PB e EE (Tabela 14).

Conforme a análise dos dados da tabela 14, observa-se que o processo de desidratação aumentou o teor de MS da casca de mandioca no ensaio 1($p<0,05$), passou de 365,1g/kg (*in natura*) para 898,3 g/kg (desidratado). Em relação à MM, houve efeito da desidratação sobre seus teores de MM na casca de mandioca ($p<0,05$). Notou-se uma diminuição no teor de MM de 48,8 g/kg na casca *in natura*, na 38,0 g/kg nas cascas desidratadas.

Nas variáveis FDN e FDA, a desidratação resultou em uma diminuição nos teores ($p<0,05$) para a casca do ensaio 1. Observou-se que após o processo, o teor de FDN que antes era 150,9 g/kg, diminuiu para 138,9 g/kg. Já no teor de FDA, essa diminuição foi de 114,6 g/kg (*in natura*) para 90,8 g/kg (desidratado).

Nas frações HEM e CNF, o processo de desidratação proporcionou um aumento nos teores na casca de mandioca durante o ensaio 1($p<0,05$). Os teores de HEM antes da desidratação eram de 37 g/kg aumentando para 46,2 g/kg. No CNF, os teores passaram de 758,1 g/kg para 780,4 g/kg nas cascas de mandioca.

No ensaio 2, constatou-se efeito da desidratação apenas nas variáveis MS e MM ($p<0,05$) (Tabela 14). O teor de MS aumentou de 368,5 g/kg para 861,3 g/kg nas cascas após a desidratação. Enquanto o teor de MM diminuiu 48,9 g/kg para 34,3 g/kg. Nas demais variáveis analisadas, não foram observados efeitos da desidratação.

Em relação ao ensaio 3, ainda na tabela 14, observou-se efeito da desidratação nas variáveis MS, EE, FDN, FDA e HEM ($p<0,05$). Já nas variáveis MM, PB e CNF, não foram observados diferenças sobre os seus teores.

Nas variáveis MS, FDN, FDA e HEM, o processo de desidratação da casca de mandioca proporcionou um aumento nos teores. Após a desidratação, o teor de MS aumentou de 323,3 g/kg para 881,4 g/kg ($p<0,05$), e o teor de FDN passou de 167,5 g/kg para 190,1 g/kg (Tabela 14). Na FDA o teor aumentou de 118,6 g/kg para 129,7 g/kg, e HEM aumentou de 49,9 g/kg para 64,5 g/kg.

No entanto, houve diminuição no teor de EE na casca de mandioca desidratada, passando de 13,2 g/kg para 7,6 g/kg ($p<0,05$) (Tabela 14).

Tabela 14. Composição química das cascas de mandioca durante os ensaios.

Variáveis (g/kg MS)	Ensaio 1			
	<i>In natura</i>	Desidratado	EPM	P-valor
MS	365,1b	898,3a	0,27	<0,01
MM	48,8a	38,0b	0,27	<0,01
PB	33,3	31,9	0,27	0,05
EE	6,69	7,60	0,27	0,31
FDN	150,9a	138,9b	0,27	0,01
FDA	114,6a	90,8b	0,27	<0,01
HEM	37,0b	46,2a	0,27	0,01
CNF	758,1b	780,4a	0,27	<0,01
Ensaio 2				
MS	368,5b	861,3a	0,26	<0,01
MM	48,9a	34,3b	0,26	<0,01
PB	32,9	32,4	0,26	0,38
EE	6,9	7,9	0,29	0,14
FDN	138,3	120,5	0,25	0,19
FDA	93,2	86,9	0,26	0,50
HEM	41,7	36,9	0,27	0,17
CNF	775,1	801,4	0,26	0,07
Ensaio 3				
MS	323,3b	881,4a	0,27	<0,01
MM	71,0	62,3	0,26	0,05
PB	43,1	41,8	0,26	0,28
EE	13,2a	7,6b	0,28	<0,01
FDN	167,5b	190,1a	0,27	0,01
FDA	118,6b	129,7a	0,26	0,04
HEM	49,9b	64,5a	0,27	<0,01
CNF	700,7	702,4	0,29	0,89

MS – Matéria seca; MM – Matéria mineral; PB – Proteína bruta; EE – Extrato Etéreo; FDN – Fibra em detergente neutro; CNF – Carboidratos não fibrosos; FDA – Fibra em detergente ácido; HEM - Hemicelulose

3.4 Discussão

3.4.1 Curvas de secagem

Os resultados obtidos demonstraram que o modelo de Page foi efetivo para descrever a cinética de secagem das cascas de mandioca, apresentando altos coeficientes de determinação ($R^2 > 0,94$). Segundo Vera *et al.* (2021), o modelo de Page tem sido amplamente aplicado em estudos que predizem a secagem de tubérculos como Batatas e Mandioca, por apresentar melhores ajustes para a taxa de secagem. Em partes, esse resultado está relacionado ao fato que o modelo compensa a deficiência do modelo exponencial, adicionando o parâmetro “n” (Simpson *et al.*, 2017).

No geral, todas as curvas apresentaram comportamento característico na secagem de produtos agrícolas, no qual verifica-se uma perda de umidade mais rápido no início do processo, com redução progressiva com passar do tempo. De acordo com Silva *et al.* (2008), esse comportamento é comumente observado no período da taxa decrescente, na secagem de produtos agrícolas. Diversos trabalhos relatam esse mesmo comportamento, em mais variados produtos, como: massa de mandioca (Castiglioni *et al.*, 2013), batata-doce (Rodrigues *et al.*, 2021) e casca de tomate (Popescu *et al.*, 2023).

A perda de umidade acentuada no início da secagem pode ser explicada pela evaporação da água superficial livre, enquanto a redução gradual ao longo do tempo está relacionada a remoção da água associada a estrutura do produto (Souza *et al.*, 2020).

As variações observadas na pesquisa são esperadas, visto que cada ensaio foi realizado em épocas diferentes. As condições climáticas, como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, influenciam na secagem de alimentos, podendo proporcionar secagens mais rápidas ou lentas (Silva, 2022; Reis *et al.*, 2015). Do mesmo modo, os valores dos parâmetros sofrem influências das condições de secagem, sendo o “k” representando os efeitos da temperatura (Babalis & Belessiotis, 2004). Já o “n”, está associado como um coeficiente de ajuste do tempo, possibilitando adaptação do modelo aos dados e corrigindo possíveis erros provenientes do modelo (Guedes & Faria, 2000; Page, 1949). Logo, o parâmetro “n” no modelo de Page também está relacionado com a resistência do material a secagem (Perez *et al.*, 2013).

O Ensaio 1 apresentou um ajuste altamente consistente com o comportamento esperado para o processo de secagem, como indicado pelo seu elevado valor de k (0,0246), o que demonstra a eficiência do processo. Essa alta eficiência pode ser atribuída às condições climáticas da época em que o ensaio foi realizado, conhecida como estação

seca na região, com temperatura média de 33°C e umidade relativa de máxima de 79%, média de 54% e mínima de 35%.

Apesar de o Ensaio 2 ter apresentado um coeficiente de determinação satisfatório, o ajuste da curva não representou de forma precisa as horas finais, não acompanhando adequadamente essa fase. A falta de ajuste ao modelo, pode estar relacionada a variação das condições climáticas ao longo do ensaio. Este experimento foi realizado no período de transição entre o final do período seco e o início do período do chuvoso, observando-se chuvas ao longo do ensaio, diminuindo ao final do processo. Nessa fase, foram observadas temperatura máxima de 42 °C e mínima de 25 °C, e umidade entre 38% e 99%. Essa variação nas condições ambientais pode ter contribuído para o comportamento da perda de umidade, impactando o ajuste do modelo na fase final. Segundo Castiglioni *et al.* (2013), o efeito da temperatura no processo de secagem deve-se a energia cinética das moléculas de água. O aumento da temperatura eleva a energia cinética, o que diminui as forças de atração entre a água e o material, levando a um decréscimo da umidade.

No Ensaio 3, o processo de secagem foi mais lento em comparação aos demais, o que é indicado pelo menor valor da constante de secagem ($k=0,0119$). Isso sugere que o material possuía uma resistência interna maior ao fluxo de umidade. Além disso, o alto valor do parâmetro “n” (1,5448) reflete como o processo desacelerou de forma acentuada ao longo do tempo, um comportamento característico de quando a difusão da água, fortemente ligada à estrutura do material, se torna predominante. De acordo com Perez *et al.* (2013), esse parâmetro está relacionado à resistência interna do material à secagem. Durante esse período, a temperatura média foi de 38 °C uma umidade relativa do ar entre 30% e 58%.

3.4.2 Composição química

Em todos os três ensaios, a matéria seca da casca de mandioca aumentou após a secagem, esse resultado é esperado e necessário para indicar a eficiência do processo. Teores de umidade entre 10% e 18% são indicados para obter um material conservado e sem prejuízos no armazenamento (Evangelista e Lima, 2013). Esse resultado está dentro da faixa observada em outras pesquisas que desidrataram a casca de mandioca ao sol, como de Ojediran *et al* (2024) e de Prado *et al* (2000).

A matéria mineral na casca diminuiu após a secagem. O processo de secagem pode, em certas condições, causar a perda de minerais voláteis ou de partículas finas que

são arrastadas pelo fluxo de ar durante a evaporação, o que poderia justificar a diminuição observada (Lama & Mondal, 2020).

No ensaio 3 o EE apresentou diminuição após o processo de secagem, esse resultado pode ser justificado por perdas de compostos lipossolúveis e voláteis presentes na fração do EE (ElGamal *et al.*, 2023). Resultado semelhante foi verificado no estudo de Faria *et al.* (2011), no qual é observado uma redução de aproximadamente 56% de EE após a desidratação da casca de mandioca, o que corrobora com o presente resultado.

A desidratação apresentou efeito variável entre os ensaios para FDN e FDA. No ensaio 1 observou-se uma diminuição, que pode estar relacionada solubilização ou degradação parcial de componentes da parede celular durante o processo. Schneider *et al.* (2024) em seu estudo verificou redução linear nos componentes da fibra durante o processo de desidratação e armazenamento de feno de capim vaquero, atribuída a degradação e solubilização dos compostos da parede celular. Já no ensaio 3, notou-se um aumento, pode ser atribuído ao efeito de concentração da fibra, já que a perda de água e até a degradação de compostos não fibrosos fazem a proporção de fibra na MS aumentar (Bueno *et al.*, 2017). Niayale, Addah e Ayantude (2020), observaram diminuição no teor de FDN e aumento no teor de FDA em casca de mandioca após a secagem.

Os teores de HEM aumentaram nas cascas de mandioca desidratada. Esse resultado pode ser explicado pelo cálculo da fração, uma vez que a hemicelulose é obtida pela diferença entre FDN e FDA. Logo, o incremento mais acentuado da FDN em relação à FDA resultou em maiores valores de HEM.

O CNF apresentou efeito apenas no ensaio 1, apresentando um aumento após a desidratação. Esse resultado pode ser explicado pelo efeito de concentração da matéria seca, associado à redução das frações fibrosas (FDN e FDA), o que eleva proporcionalmente os carboidratos não fibrosos.

Vale ressaltar que a variabilidade observada nos resultados pode ser influenciada por fatores ambientais, do processo e da composição química do alimento. Por se tratar de um derivado agroindustrial, dependente do processamento de origem, a composição varia. Além disso, a exposição direta ao sol pode causar reações de degradação e perdas, alterando a composição química e a qualidade do alimento (Resch, Adler, Potsch, 2014; Sengul *et al.*, 2019).

3.5 Conclusão

A desidratação da casca de mandioca é influenciada pelas condições ambientais de temperatura e umidade, podendo ser realizada nos meses de julho, outubro e dezembro. No entanto, no mês de outubro, a taxa de desidratação é mais elevada, o que possibilita a secagem das cascas com 44h de exposição ao sol, totalizando em média cinco dias.

Em regiões de clima tropical úmido, é possível realizar a desidratação da casca de mandioca para a obtenção de um farelo, desde que o processo seja realizado em períodos de elevada temperatura, e que a umidade esteja em torno de 40 a 70%. Isso possibilita o armazenamento e a utilização desse alimento na formulação de rações para animais de pequenos e médios produtores.

3.6 Referências bibliográficas

- ALAMAR, P. D. **Caracterização do perfil de fibras em resíduos agroindustriais amazônicos e de sua capacidade de adsorção seletiva.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Pará) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.
- BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs. **Journal of food Engineering**, v. 65, n. 3, p. 449-458, 2004.
- BUENO, A.V.I. *et al.* Método de obtenção de matéria seca e composição química de volumosos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 18, p. e44913, 2017.
- CASTIGLIONI, G. L. *et al.* Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 987-994, 2013.
- CELESTINO, S.M.C. **Princípios de secagem de alimentos.** 2010.
- CORDEIRO, N.K. *et al.* Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 23-34, 2020.
- DA SILVA, Á. C. *et al.* Utilização da raiz de mandioca desidratada, em substituição ao milho, na suplementação de vacas holandesas em pastejo sobre o consumo voluntário, digestibilidade aparente e metabolismo energético. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3Sup11, p. 2259-2274, 2015.
- DETMANN, E., et al., **Métodos para análise de alimentos.** 2 ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2021. 350p.
- DOURADO, D.P. *et al.* Potencialidade da casca da mandioca como resíduo proveniente de fecularia. In: **Agronomia: jornadas científicas-volume 2.** Editora Científica Digital. p. 167-172, 2020.

ELGAMAL, R. *et al.* Thermal degradation of bioactive compounds during drying process of horticultural and agronomic products: A comprehensive overview. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1580, 2023.

EVANGELISTA, A. R.; LIMA, J. A. Produção de feno. **Informe Agropecuário**, v. 34, n. 277, p. 43-52, 2013.

FARIA, P.B. *et al.* Processamento da casca de mandioca na alimentação de ovinos: desempenho, características de carcaça, morfologia ruminal e eficiência econômica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 2929-2937, 2011.

FELIPE, F.I.; ALVES, L.R.A.; CAMARGO, S. G. C. Panorama e perspectivas para a indústria de fécula de mandioca no Brasil. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 6, p. 134-146, 2010.

FERREIRA, G.D.G. *et al.* Valor nutritivo de co-produtos da mandioca. **Rev. Bras. Saude Prod. An.**, v.8, n.4, p. 364-374, 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAOSTAT. Roma: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 14 jan. 2025.

PEREZ, L. C.G. *et al.* Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 102-106, 2013.

GUEDES, A.M.M.; FARIA, L.J.G. Determinação da constante de secagem de urucum (*Bixa orellana L.*) em secador convectivo de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p. 73-86, 2000.

IHEDIWA, Victor Ejikeme *et al.* Thermal dehydration of some forage grasses for livestock feeding: Effect of different methods on moisture diffusivity and the quality of dried leaves. **Energy Nexus**, v. 8, p. 100156, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (SIDRA). Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618#resultado>>. Acesso em: 04 de jan. de 2025.

LAMA, H.; MONDAL, R. The physics of drying of colloidal dispersion: Pattern formation and desiccation cracks. **arXiv preprint arXiv:2011.14029**, 2020.

MAGALHÃES, A. L. R. *et al.* Composição química, fracionamento de carboidratos e compostos nitrogenados, cinética da degradação ruminal e produção de gás in vitro de genótipos de palma forrageira. **Ciência Animal Brasileira**, v. 22, 2021.

MIDILLI, ADNAN; KUCUK, HAYDAR; YAPAR, Z.İ. YA. A new model for single-layer drying. **Drying Technology: An International Journal**, v. 20, n. 7, pág. 1503-1513, 2002.

MÜHLBAUER, W.; MÜLLER, J. Drying kinetics. **Drying Atlas**, p. 53-61, 2020.

NIAYALE, R.; ADDAH, W.; AYANTUNDE, A.A. Effects of ensiling cassava peels on some fermentation characteristics and growth performance of sheep on-farm. **Ghana Journal of Agricultural Science**, v. 55, n. 2, p. 107-121, 2020.

OJEDIRAN, T.K. *et al.* High-quality-cassava peel meal: Impact on growth performance, blood characteristics, and economic indices of grower pigs. **Thai Journal of Agricultural Science**, v. 57, n. 2, p. 58– 71-58– 71, 2024.

OLIVEIRA, J. S. *et al.* Como medir a matéria seca (MS%) em forragem utilizando forno de micro-ondas. EMBRAPA: **Comunicado técnico 77**, 2015.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Dissertação de Mestrado, Universidade Purdue, West Lafayette, Indiana, 1949. PERESSIN, V.A.; COSTA, N.V.; CARVALHO, J.E.B.; FELTRAN, J.C. Manejo Integrado de Plantas Daninhas Em Mandioca: Um Desafio Ambientalmente Correto. Campinas: **Instituto Agronômico**, 67p, 2022.

POPESCU, M. *et al.* Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics of tomato peels: Influence of drying temperature on the energy requirements and extracts quality. **Foods**, v. 12, n. 20, p. 3883, 2023.

PRADO, I.N. *et al.* Desempenho de novilhas alimentadas com rações contendo milho ou casca de mandioca como fonte energética e farelo de algodão ou levedura como fonte protéica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, p. 278-287, 2000.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engineering in Agriculture**, v.19, n.1, p. 19-27, 2011.

RAMOS, A.F. *et al.* **Alimentos e alimentação**. 2020.

REIS, D.R. *et al.* Influência das características do ar na cinética de secagem de pimenta variedade bico. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, p. 146-154, 2015.

RESCH, R.; ADLER, A.; PÖTSCH, E. M. **Impact of different drying techniques on hay quality**. 2014.

RODRIGUES, J.J. *et al.* Análise cinética de secagem solar em amostras de batata doce. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 43122-43130, 2021.

SANTANA, T.P. *et al.* **Caracterização bromatológica de casca de mandioca e da manipueira para utilização na alimentação animal**. 2014.

SANTOS, V.L.F. *et al.* Rumen parameters of sheep fed cassava peel as a replacement for corn. **Small Ruminant Research**, v. 133, p. 88-92, 2015.

SCHNEIDER, C.R. *et al.* Alterações na composição bromatológica do feno de capim vaquero na desidratação e armazenamento. **Observatorio de la economía latinoamericana**, v. 22, n. 7, p. e5676-e5676, 2024.

SENGUL, A.Y. *et al.* The effects of various drying methods on the nutrient composition of alfalfa varieties. 2019.

SILVA, J. S. *et al.* Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. **Viçosa: Aprenda Fácil.** 2008.

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

SIMPSON, R. *et al.* Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. **Trends in Food Science & Technology**, v. 62, p. 194-201, 2017.

SNIFFEN CJ, O'C. JD, Van Soest PJ. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. **J. Anim. Sci.** 1992; 70(11):3562-3577. Disponível em: <https://doi.org/10.2527/1992.70113562x>

SOUTO, L.R.F. *et al.* Utilization of residue from cassava starch processing for production of fermentable sugar by enzymatic hydrolysis. **Food Science and Technology**, v.37, p. 19-24, 2016.

SOUZA, T.L. *et al.* Processo de secagem solar e transferência de massa em amostras de mandioca. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 86647-86657, 2020.

VERA, Flordeliza H.C. *et al.* A comprehensive review on the drying kinetics of common tubers. **Applied Science and Engineering Progress**, v. 14, n. 2, p. 146-155, 2021.

VILHALVA, D.A.A. *et al.* Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 331-339, 2012.