

ISOTERMAS DE SORÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*):
RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE DE ÁGUA E FORÇA DE RUPTURA DA CASCA

MARIANA ELENE COSTA PEREIRA BENEVIDES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2025

ISOTERMAS DE SORÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*):
RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE DE ÁGUA E FORÇA DE RUPTURA DA CASCA

MARIANA ELENE COSTA PEREIRA BENEVIDES

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestra em Produção Vegetal.”

Orientador: Prof. Dr. Daniel Gonçalves
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Nádia Rosa Pereira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

B465

Benevides, Mariana Elene Costa Pereira.

Isotermas de sorção de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) : Relação entre atividade de água e força de ruptura da casca / Mariana Elene Costa Pereira Benevides. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

197 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2025.

Orientador: Daniel Gonçalves.

Coorientadora: Nadia Rosa Pereira.

1. Castanha do Pará. 2. Castanha da Amazônia. 3. Descascamento. 4. Adsorção. 5. Dessorção. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

ISOTERMAS DE SORÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*):
RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE DE ÁGUA E FORÇA DE RUPTURA DA CASCA

MARIANA ELENE COSTA PEREIRA BENEVIDES

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestra em Produção Vegetal.”

Aprovado em 13 de agosto de 2025.

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Eder Dutra de Resende (D.Sc., Engenharia Química) – UENF

Prof^a. Dr^a. Nádia Rosa Pereira (D.Sc., Engenharia de Alimentos) – UENF

Prof^a. Dr^a. Christianne Elisabete da Costa Rodrigues (D.Sc., Engenharia de Alimentos) – FZEA/USP

Prof. Dr. Daniel Gonçalves (D.Sc., Engenharia de Alimentos) – UENF
Orientador

Dedico este trabalho à minha família, por todo amor, incentivo e por me sustentarem nos momentos mais desafiadores. E ao meu marido, Leonardo, pela presença paciente, pelo cuidado diário e por dividir comigo a alegria de ver esta etapa se concretizar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, proteção e direção em todos os momentos desta caminhada.

Aos meus pais, Marília Elisa e Jorge Luiz, e à minha irmã Vanessa Elene, por acreditarem no meu potencial e por serem meu alicerce.

Ao meu marido Leonardo Benevides, por estar sempre ao meu lado nos momentos mais desafiadores, apoiando-me incondicionalmente e celebrando cada conquista comigo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Daniel Gonçalves e à minha coorientadora Profa. Dra. Nádia Pereira, pela orientação competente, pela paciência, confiança e contribuições valiosas para a realização deste trabalho.

Às minhas amigas Laís, Ana Carolina, Thayná, Bruna, Amilly, Karen, Geovana, Ana Clara, Lavynya e Pâmela, por tornaram esta jornada mais leve e prazerosa.

À aluna de Iniciação Científica Laís por toda ajuda nos experimentos.

À Valdinéia, pela ajuda essencial nos experimentos e pelas conversas sempre construtivas.

Ao Prof. Dr. Victor Perez e à técnica Fabriny, pela disponibilidade e auxílio no uso do equipamento de leitura de atividade de água.

Ao Prof. Dr. Afonso Azevedo e à técnica Eduarda, pelo suporte no uso da Máquina Universal de Ensaio.

Ao Prof. Dr. Jurandi Gonçalves e à sua orientanda Isabelle, pela atenção e auxílio no uso do colorímetro.

À COOPAVAM, pelo fornecimento das castanhas, tornando viável a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Fundação Carlos Chagas de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela concessão de recursos à pesquisa (processos E-26/204.407/2024 e E-26/210.297/2023).

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação pela concessão do auxílio no Programa de Apoio à Pesquisa, Inovação e Cultura (PAPIC) (processo SEI-260002/007073/2024).

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições e pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho, enriquecendo-o com suas sugestões e considerações.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada acadêmica, deixo minha sincera gratidão.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO.....	1
OBJETIVOS.....	4
Objetivo geral	4
Objetivos específicos	4
REVISÃO DE LITERATURA	5
Castanha-do-brasil.....	5
Classificação botânica e características gerais.....	5
Composição nutricional	8
Importância socioeconômica e ambiental.....	10
Cadeia produtiva.....	14
Secagem de alimentos	17
Atividade de água e isoterms de sorção.....	21
Tipos de isoterms de sorção	26
Determinação de isoterms de sorção	28
Modelos matemáticos para ajustes de isoterms de sorção.....	29
Isoterms de sorção e textura de alimentos	34
MATERIAL E MÉTODOS	39
Matéria-prima.....	39
Caracterização.....	41
Atividade de água	41
Umidade.....	42
Dimensões e massas.....	43
Cor.....	45

Composição	46
Lipídios.....	47
Proteínas.....	48
Cinzas.....	51
Carboidratos.....	52
Valor energético total	53
Perfil de ácidos graxos.....	53
Acidez livre.....	54
Ensaio de isoterma de sorção	54
Secagem das castanhas para isoterma de adsorção.....	57
Contração volumétrica	58
Modelagem matemática.....	60
Avaliação da força de ruptura da casca.....	61
Análise estatística.....	63
RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
Atividade de água e umidade.....	65
Dimensões e massas	70
Composição centesimal	72
Composição de ácidos graxos do óleo das amêndoas <i>in natura</i>	76
Análise colorimétrica das castanhas Juara e Aripuanã <i>in natura</i>	79
Isotermas de dessorção	82
Isotermas de adsorção	89
Força de ruptura da casca das castanhas submetidas às isotermas de dessorção a 60 °C	94

Força de ruptura da casca das castanhas submetidas às isotermas de adsorção a 25 °C	97
Análise colorimétrica em função da atividade de água.....	101
Lotes Juara e Aripuanã submetidos a isoterma de dessorção a 60 °C	101
Casca.....	101
Amêndoa.....	106
Película.....	112
Análise comparativa da cor das castanhas Juara e Aripuanã submetidas às isotermas de dessorção a 60°C.....	118
Lote Juara e Aripuanã submetidos a isoterma de adsorção a 25 °C.....	124
Casca.....	124
Amêndoa.....	128
Película.....	133
Análise comparativa da cor das castanhas Juara e Aripuanã submetidas às isotermas de adsorção a 25°C.....	138
Análise de Componentes Principais (PCA)	141
Cinética de secagem das castanhas com casca.....	149
Contração volumétrica das castanhas Juara e Aripuanã submetidas à secagem em bandejas	155
CONCLUSÕES	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	161

RESUMO

BENEVIDES; Mariana Elene Costa Pereira; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Agosto de 2025; ISOTERMAS DE SORÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*): RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE DE ÁGUA E FORÇA DE RUPTURA DA CASCA ; Orientador: Prof. Dr. Daniel Gonçalves; Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Nádia Rosa Pereira.

Nativa da Amazônia, a castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) é uma das espécies arbóreas de maior importância da região, cuja exploração sustentável gera benefícios socioeconômicos e ambientais. A Cooperativa dos Agricultores do Vale do Amanhecer (COOPAVAM), localizada em Juruena/MT, relata dificuldades no beneficiamento da castanha-do-brasil, especialmente na etapa de descascamento. O processamento térmico prévio (secagem e cozimento) tende a deixar as castanhas mais quebradiças, favorecendo a quebra da amêndoa e, conseqüentemente, a redução da qualidade e do rendimento industrial. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a força de ruptura da casca de castanhas-do-brasil sob diferentes condições de umidade e atividade de água (a_w), visando definir parâmetros adequados da matéria-prima para o beneficiamento. Castanhas coletadas em duas regiões da floresta Amazônica e processadas pela COOPAVAM (territórios indígenas de Juara e Aripuanã) foram caracterizadas morfológica e quimicamente. As isotermas de sorção foram construídas pelo método estático gravimétrico nas temperaturas de 25 e 60 °C. Para os ensaios de dessecagem, utilizaram-se castanhas *in natura*, enquanto para a adsorção, as amostras foram previamente secas a 60 °C até atingir a umidade de equilíbrio. A força de ruptura da casca foi determinada por meio de uma máquina de ensaio universal, sob os diferentes níveis de umidade definidos pelas isotermas. A cor das três frações da castanha (casca, película da amêndoa e amêndoa) foi analisada nas amostras *in natura* e nos pontos das isotermas, com base na escala CIE-L*a*b*. O lote Aripuanã apresentou maior dimensão morfométrica para castanhas inteiras e amêndoas, além de teores mais elevados de lipídios e proteínas nas amêndoas. As diferenças entre os lotes também se refletiram na força de ruptura da casca: em mesmas faixas de a_w , as castanhas Juara exigiram maior força para rompimento, indicando maior resistência mecânica. Esses resultados reforçam a relevância de se

considerar a origem geográfica e o perfil do material na definição de estratégias de processamento, contribuindo para a redução de perdas por quebra da amêndoa e melhora da eficiência industrial. As isotermas de dessorção apresentaram padrão sigmoidal tipo II, típico de produtos higroscópicos. Os teores de umidade da monocamada (X_m), considerados seguros para armazenamento, foram de 5 ± 1 g $H_2O/100$ g b.s para Juara e $3,6 \pm 0,2$ g $H_2O/100$ g b.s para Aripuanã. Durante o processo de secagem em condição não estacionária, conduzido em sistema de ar quente a $60^\circ C$, ambos os lotes apresentaram comportamento similar, atingindo a umidade de equilíbrio em 16h e contração volumétrica semelhante. Dentre os modelos matemáticos avaliados, o de Page foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de secagem. Além disso, constatou-se que níveis elevados de a_w ($> 0,6$) nos processos de dessorção e adsorção provocaram escurecimento perceptível das amêndoas. A Análise de Componentes Principais (PCA) confirmou a diferenciação entre lotes e condições higroscópicas. Em ambos os ensaios (adsorção e dessorção), os dois primeiros componentes explicaram mais de 80% da variância total, indicando alta representatividade do modelo. Os resultados evidenciam a importância do controle da umidade e das condições higroscópicas para manter a integridade física, a estabilidade e a qualidade comercial da castanha-do-brasil.

Palavras-chave: Castanha do Pará; Castanha da Amazônia; Descascamento, Adsorção; Dessorção.

ABSTRACT

BENEVIDES; Mariana Elene Costa Pereira; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; August 2025; SORPTION ISOTHERMS OF BRAZIL NUT (*Bertholletia excelsa*): RELATIONSHIP BETWEEN WATER ACTIVITY AND SHELL BREAKING FORCE ; Advisor: Prof. Dr. Daniel Gonçalves; Co-Advisor: Prof^a. Dr^a. Nádia Rosa Pereira.

Native from Amazon, the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) is one of the most important arboreal species in the region, whose sustainable exploitation provides socioeconomic and environmental benefits. The Cooperative of Farmers from Vale do Amanhecer (COOPAVAM), located in Juruena, Mato Grosso, reports difficulties in processing Brazil nuts, particularly during the shelling stage. Preliminary thermal processing (drying and cooking) tends to make the nuts more brittle, leading to kernel breakage and, consequently, reduced quality and industrial yield. In this context, the present study aimed to evaluate the rupture force of Brazil nut shells under different moisture content and water activity (a_w) conditions, in order to define suitable parameters of the raw material for processing. Nuts collected from two regions of the Amazon forest and processed by COOPAVAM (indigenous territories of Juara and Aripuanã) were morphologically and chemically characterized. Sorption isotherms were constructed using the static gravimetric method at 25 and 60 °C. For desorption assays, *in natura* nuts were used, while for adsorption assays, samples were pre-dried at 60 °C until equilibrium moisture content was reached. The rupture force of the nut shell was determined using a universal testing machine under the different moisture levels defined by the isotherms. The color of the three nut fractions (shell, kernel skin, and kernel) was analyzed *in natura* samples and at the isotherm points, based on the CIE-L*a*b* color scale. The Aripuanã batch exhibited larger morphometric dimensions for whole nuts and kernels, as well as higher lipid and protein contents in the kernels. Differences between batches were also reflected in shell rupture force: at similar a_w ranges, Juara nuts required higher force to break, indicating greater mechanical resistance. These results highlight the relevance of considering geographic origin and material profile when defining processing strategies, contributing to the reduction of kernel breakage losses and improved industrial efficiency. The desorption isotherms showed a sigmoidal type II pattern, typical

of hygroscopic products. Monolayer moisture contents (X_m), considered safe for storage, were 5 ± 1 g $H_2O/100$ g d.b. for Juara and 3.6 ± 0.2 g $H_2O/100$ g d.b. for Aripuanã. During non-stationary drying at 60 °C in a hot-air system, both batches exhibited similar behavior, reaching equilibrium moisture within 16h and showing comparable volumetric shrinkage. Among the mathematical models evaluated, the Page model provided the best fit to the experimental drying data. Furthermore, high a_w levels (> 0.6) during desorption and adsorption processes caused a noticeable darkening of the kernels. Principal Component Analysis (PCA) confirmed the differentiation between batches and hygroscopic conditions. In both adsorption and desorption assays, the first two components explained more than 80 % of the total variance, indicating strong representativeness of the model. The results emphasize the importance of controlling moisture and hygroscopic conditions to preserve the physical integrity, stability, and commercial quality of Brazil nuts.

Keywords: Pará nut; Amazon nut; Shelling; Adsorption; Desorption.

INTRODUÇÃO

Produzindo um dos frutos de maior importância para os povos que habitam a região amazônica, a castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*, Humb. e Bonpl., 1808), espécie pertencente à família *Lecythidaceae*, é também muito conhecida popularmente como castanha da Amazônia ou castanha do Pará, e se destaca na imensidão da floresta. Podendo atingir mais de 50 metros, estas árvores são responsáveis pela produção de sementes comestíveis (amêndoas), os quais sua exploração e comercialização são realizadas através do extrativismo (SILVA JÚNIOR et al., 2017).

Com significativa importância na movimentação da economia e do comércio principalmente da região Amazônica, através do emprego de milhares de famílias em sua cadeia produtiva que compreende todas as etapas básicas até a comercialização, as amêndoas da castanheira-do-brasil possuem alto valor nutricional, sendo comumente comercializadas *in natura* (com ou sem película) ou explorada em função do óleo extraído por prensagem mecânica. Conforme mencionado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2017), a castanha é fonte de fibras, lipídios, proteínas, além de ser rica em vitaminas e minerais como selênio, magnésio, potássio e zinco.

Em função do significativo valor econômico e nutricional da castanha-do-brasil, é necessário que sejam tomados cuidados durante seu beneficiamento, surgindo, portanto, a necessidade de maior conhecimento das características específicas deste material. De acordo com Castro (2017), a cadeia produtiva da espécie carece não somente de mais informações quantitativas, como de informações qualitativas a respeito de processos pós-colheita adequados.

Como um dos principais processos empregados na cadeia de beneficiamento da castanha-do-brasil, destaca-se a secagem. Nos tecidos vegetais, a secagem impede que ocorra degradação enzimática e proliferação de microrganismos através da retirada de água livre mantendo, assim, a estabilidade e qualidade do material (Hill et al., 2012). Deste modo, embora o teor de água seja um fator de grande influência nos alimentos em geral, o

potencial de deterioração de um determinado produto não pode ser medido através da quantidade total de água contida no mesmo.

Neste sentido, o conceito de atividade de água (a_w) consiste em um parâmetro efetivo na determinação da estabilidade de alimentos. Em termos práticos, a_w caracteriza-se como sendo a medida que possibilita a avaliação da disponibilidade de água acessível a reações, indicando a intensidade das forças que unem os componentes não aquosos de um alimento com a água e, conseqüentemente, a água que se encontra suscetível a ocorrência de diversas reações químicas e enzimáticas (NGUYEN et al., 2004; AL-MUHTASEB et al., 2002).

As isotermas de sorção são ferramentas capazes de fornecer informações a respeito da relação entre a a_w e a umidade total de um produto, possuindo, portanto, grande importância no que diz respeito à definição de processos de secagem adequados (dessorção), bem como em relação às condições de armazenamento de materiais secos (adsorção). As isotermas de sorção podem, portanto, ser construídas pelo método estático-gravimétrico, que consiste em experimentos que relacionam a umidade relativa controlada da atmosfera em que um determinado alimento se encontra com a sua umidade total resultante (AL-MUHTASEB et al., 2002).

O presente trabalho se encontra vinculado ao projeto principal de pesquisa "Fortalecimento da cadeia de valor da castanha-do-brasil: uma abordagem focada na Cooperativa dos Agricultores do Vale do Amanhecer (Juruena/MT)" da Chamada Amazônia +10. Esta iniciativa busca promover o desenvolvimento sustentável na região amazônica através de projetos que fortaleçam as cadeias produtivas, incentivem práticas de manejo sustentável e aumentem a valorização dos produtos locais (INICIATIVA AMAZÔNIA +10, 2023). O projeto principal em questão visa superar os desafios tecnológicos enfrentados pela COOPAVAM, através da implementação de quatro subprojetos focados na melhoria da qualidade do óleo da castanha, no aproveitamento de subprodutos, no desenvolvimento de novas tecnologias, e na adoção de práticas de manejo sustentável, contribuindo assim para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da região.

Uma das principais dificuldades relatadas pela Cooperativa diz respeito à etapa de descascamento das castanhas. Etapas anteriores do

beneficiamento como a secagem e cozimento em autoclave podem gerar um material muito quebradiço, acarretando a quebra da amêndoa durante o descascamento e, conseqüente, perda de qualidade e de material, visto que amêndoas quebradas não são comercializadas pela cooperativa *in natura*. Deste modo, tem-se que o estudo de isotermas de sorção é capaz fornecer um conjunto de informações relevantes para a compreensão das condições gerais tanto do processo de secagem, quanto do armazenamento do material seco, além de permitir a definição de algumas condições adequadas do produto para outras etapas de beneficiamento. Ademais, a avaliação da força de ruptura da casca da castanha-do-brasil frente à diferentes condições de umidade é crucial, pois afeta diretamente a etapa de descascamento, permitindo otimizar a eficiência do processo, a qualidade do produto e evitar perdas.

Até o momento, não foram encontrados na literatura científica estudos que abordem o comportamento higroscópico através de isotermas da castanha-do-brasil em sua forma integral, ou seja, com a casca intacta, em nenhuma faixa de atividade de água. Os poucos trabalhos disponíveis se concentram, majoritariamente, na amêndoa isolada, desconsiderando a presença da casca. Esta fração, embora seja frequentemente descartada, possui relevância tecnológica e industrial, especialmente em processos como a secagem e o descascamento. A ausência de dados sobre isotermas de sorção da castanha com casca representa uma lacuna importante no conhecimento técnico-científico e limita a compreensão do comportamento global da castanha durante o seu beneficiamento.

OBJETIVOS

Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo principal a avaliação do comportamento higroscópico e físico de castanhas-do-brasil com casca e a definição de condições adequadas da matéria-prima para o seu descascamento e armazenamento, com o intuito de reduzir quebras indesejadas e melhorar os aspectos de produção da castanha pela COOPAVAM.

Objetivos específicos

- 1) Avaliar diferenças físicas, morfológicas, composição química e centesimal de castanhas-do-brasil de diferentes regiões amazônicas processadas pela cooperativa;
- 2) Realizar ensaios de isotermas de dessorção (secagem) da castanha-do-brasil a 60 °C;
- 3) Realizar o estudo do comportamento higroscópico da castanha-do-brasil através da construção de isotermas de adsorção a 25 °C;
- 4) Avaliar a força de ruptura da casca de castanha-do-brasil sob diferentes níveis de umidade e a_w estabelecidos pelas isotermas de dessorção e adsorção;
- 5) Ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais para representação das isotermas, estimando teores de água seguros para o armazenamento;
- 6) Avaliar a cinética de secagem de castanhas-do-brasil a 60°C;
- 7) Identificar as melhores condições de umidade da castanha para armazenamento.

REVISÃO DE LITERATURA

Castanha-do-brasil

Classificação botânica e características gerais

Nativa da região Amazônica, a castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*), espécie arbórea, destaca-se “como símbolo dessa região e ícone de sua conservação” (WADT, et al., 2023). Descrita no ano de 1808 pelos europeus Alexander Von Humboldt e Aimé Bonpland, responsáveis por sua denominação científica (MORITZ, 1984), é muito conhecida popularmente como castanha do Pará, nome dado em decorrência do grande potencial produtivo do estado do Pará que, de acordo com Homma e Menezes (2014), na década de 1950 alcançou seu apogeu, tendo a espécie como principal produto extrativo para exportação. A denominação castanha-do-brasil surgiu posteriormente, através do decreto lei N°51.209, de 18 de setembro de 1961, com o intuito de favorecer o comércio exterior da matéria-prima (BRASIL, 1961).

Pertencente ao grupo das angiospermas, a castanheira-do-brasil é classificada botanicamente como sendo do filo/divisão *Magnoliophyta*, classe *Magnoliopsida*, ordem *Ericales*, família *Lecythidaceae*, gênero *Bertholletia* e espécie *excelsa*. Sendo o gênero *Bertholletia* monotipo, sua única representante trata-se portanto da *B. excelsa* (NASCIMENTO e CARVALHO, 2022), a qual pode chegar até 50 m de altura e possuir diâmetro acima do peito (DAP) superior a 3 m (SALOMÃO et al., 2006), caracteriza-se como uma das espécies de maior porte da Amazônia Ocidental, existindo registros de espécimes que apresentam idade superior a 400 anos, como relatado por Camargo et al. (1994) que, por meio de datação radiocarbônica, estimaram uma idade de 440 ± 60 anos para uma castanheira com DAP de 233 cm. Porém, alguns cientistas relatam a possibilidade da existência de exemplares

de *Bertholletia excelsa* com milhares de anos (SALOMÃO, 1991; CAMARGO et al., 1994; SALOMÃO et al., 2006).

A espécie é frequentemente encontrada em regiões de clima quente e úmido, em áreas de terra firme com solos argilosos ou argilo-arenosos (MÜLLER, 1995), desenvolvendo-se de forma mais eficiente em ambientes que apresentam maior incidência de luz (PRANCE E MORI, 1979; KAINER et al., 1999; ZUIDEMA e BOOT, 2002). Apesar de nativa, a espécie não é endêmica do Brasil, ocorrendo também na Bolívia, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname, Venezuela, Trindade e Tobago (NASCIMENTO e CARVALHO, 2022). No Brasil, observa-se sua ocorrência nas regiões Norte (Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima) e Centro-Oeste (Mato Grosso) (Flora do Brasil, 2024). Seu período de floração varia de acordo com a região, de modo que na porção mais oeste do país (Estado do Acre), as árvores florescem primeiro que no centro leste da região Norte (Estado do Pará) (MORITZ, 1984). Quanto a maturação, Yang (2009) cita que esta ocorre em aproximadamente 15 meses desde o início do desenvolvimento de novos frutos, podendo ser afetada pelas condições climáticas, meteorológicas e do solo.

Apresentando caule cilíndrico, desprovido de ramos até a copa, casca escura e fendida (MÜLLER, 1981) (Figura 1a) e ramos encurvados nas extremidades (CORRÊA, 1931), a castanheira-do-Brasil possui folhas verde escuras brilhosas, de base larga e arredondada, com pecíolo curto, cilíndrico e canaliculado, dispostas de forma espaçada e alternadas ao longo dos ramos (CORRÊA, 1931; SALOMÃO et al., 1995). Suas flores são alógamas polinizadas por abelhas grandes, possuem coloração branco-amareladas (Figura 1b) e cerca de 3 cm de diâmetro, (MORITZ, 1984).

Os frutos são denominados popularmente de ouriços, que caem quando atingem a maturação (SOUZA, 1963). Estes apresentam coloração marrom escura e possuem formato capsular esférico com mesocarpo demasiadamente duro (Figura 1c). São indeiscentes, podendo medir de 10 a 38 cm de diâmetro, pesar de 500 a 1500 g (PRANCE e MORI, 1979) e conter de 15 a 25 sementes comestíveis (castanhas) com quatro a sete centímetros de comprimento (ALMEIDA, 1963; ZUIDEMA, 2003).

As castanhas presentes no interior destes frutos caracterizam-se morfológicamente como triangulares e angulosas (Figura 2a), apresentando várias camadas tais como a testa (endocarpo lenhoso), camada mais externa rugosa em tons castanho claros e opaca, o tégmen, camada mais interna, membranosa e de coloração mais escura que a testa, e a parte comestível, a amêndoa (SANTOS et al., 2006; KLUCZKOVSKI e SCUSSEL, 2015). As amêndoas possuem formato alongado, cilíndrico irregular e polpa de coloração bege (Figura 2b) (YANG, 2009).



Figura 1. *Bertholletia excelsa*: a) árvore adulta, b) flores, c) fruto aberto, d) plântula. Fonte: Larrea-Alcázar et al. (2018).

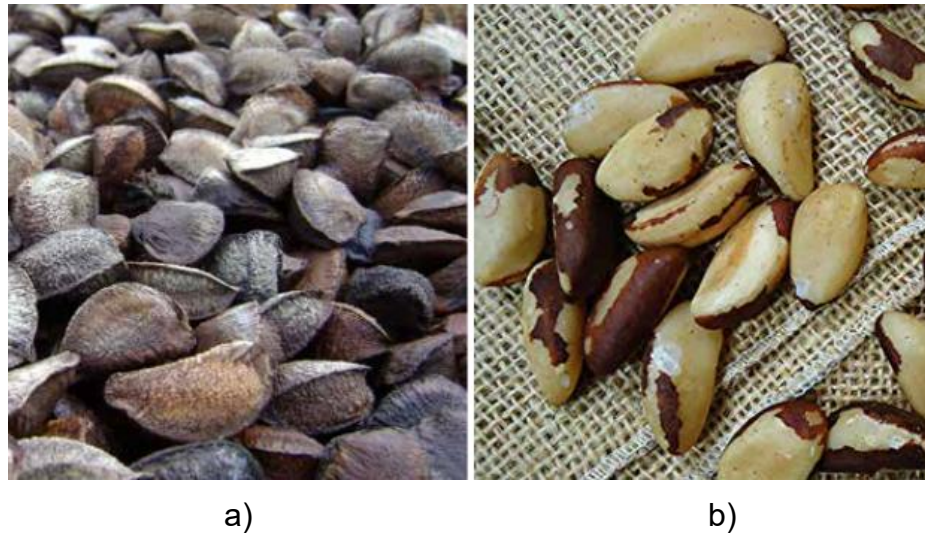


Figura 2. a) Castanha-do-brasil, b) amêndoa. Fonte: Adaptado de Nascimento e Carvalho (2022).

Composição nutricional

Em relação aos aspectos nutricionais, a castanha-do-brasil se caracteriza como um alimento de excelência, visto que é fonte de compostos de demasiada qualidade biológica (FERREIRA et al., 2006). Por ser rica em diversos minerais, vitaminas e proteínas, a valorização da castanha em diferentes setores industriais (alimentício, farmacêutico e cosmético) vem sendo cada vez mais evidenciada (BRASIL, 2020).

O elevado teor de gorduras da castanha-do-brasil a insere no grupo alimentar das oleaginosas nas quais, de modo geral, cerca de 65% de seu valor energético é proveniente de lipídios, apresentando baixo conteúdo de ácidos graxos saturados e alto teor de ácidos graxos monoinsaturados e poli-insaturados (CARDOSO et al., 2017).

Há muitas décadas é reconhecida a relevância dos ácidos graxos no desenvolvimento e nutrição humana. Valenzuela e Nieto (2003), citam que os lipídios estão presentes nas membranas celulares como constituintes estruturais, e possuem não somente funções energéticas e de reservas metabólicas, mas também atuam na formação de hormônios e sais biliares.

Conforme reportado por Yang (2009), na composição nutricional da castanha-do-brasil, os macronutrientes lipídios e proteínas se encontram em maior quantidade (em média 60-70% e 17%, respectivamente). Dentro do alto percentual de ácidos graxos, cerca de 85% são insaturados (SOUZA, 2013). Além disso, a castanha se destaca em relação a teores de vitaminas e minerais, contendo vitaminas lipossolúveis como A, B1, B2, C e E, e altos valores de ferro (Fe), Manganês (Mn), Magnésio (Mg) e Selênio (Se) (COZZOLINO, 2001; LOPES, 2021).

De acordo com Strunz et al. (2008), duas amêndoas de castanha-do-brasil contêm em média o teor de selênio (Se) correspondente ao consumo diário recomendado para benefícios à saúde (100 µg). Quando consumido da maneira recomendada, este micronutriente pode agir no organismo como antioxidante, anti-inflamatório e cardioprotetor (COZZOLINO, 2001).

Dentre os principais ácidos graxos que constituem o óleo da castanha-do-brasil, estão o ácido linoleico (45,2%) (poli-insaturado), ácido oleico (31,4%) (monoinsaturado), e os ácidos graxos saturados esteárico (8,7%) e palmítico (13,8%). Em quantidade reduzida, encontra-se o ácido palmitoléico (monoinsaturado) e mirístico (saturado) (FREITAS, et al., 2007; CHUNHIENG, et al., 2008; CAMARGO, 2010; CARVALHO, et al., 2012). De acordo com Salas-Salvadó et al. (2008), os ácidos graxos monoinsaturados e poli-insaturados contribuem para a saúde cardiovascular, ajudando na redução dos níveis de colesterol LDL e aumentando o colesterol HDL no sangue. Além disso, a presença destes ácidos graxos colabora com o funcionamento do organismo humano, atuando como veículo no transporte de vitaminas lipossolúveis (CHUNHIENG, et al., 2008; SANTOS, et al., 2015)

Na Tabela 1, está apresentada a composição centesimal dos macronutrientes lipídios, proteínas e carboidratos presentes na castanha-do-brasil relatada por diferentes autores. Analisando os dados apresentados na Tabela 1, observa-se o elevado valor calórico desta castanha, com valores próximos a 700 kcal, provenientes basicamente da sua elevada concentração de lipídios, em torno de 65% em massa.

Tabela 1. **Composição centesimal da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*), em % mássica (g/100 g) e valor energético, em kcal/100 g.**

Autores	Composição centesimal da castanha-do-brasil (%)				Valor energético (kcal/100 g)
	Umidade	Lipídios	Proteínas	Carboidratos	
Andrade et al. (1999)	5,60	66,80	13,60	10,30	nd
Franco (2003)	3,50	67,00	17,00	7,00	699,00
Souza e Menezes (2004)	3,13	67,30	14,29	3,42	676,56
Venkatachalam e Sathe (2006)	3,07	66,71	13,93	0,69	nd
Santos (2008)	4,98	65,33	18,22	8,72	695,73
Neto et al. (2009)	4,91	68,58	16,50	5,69	nd
Freitas e Naves (2010)	3,10	64,94	14,11	6,27	665,98
TACO (2011)	3,50	63,50	14,50	7,20	643,00
Balbi et al. (2014)	4,35	67,52	14,28	6,56	691,00

nd: Não determinado

Importância socioeconômica e ambiental

A castanha-do-brasil se caracteriza como um produto e uma cadeia de valor estratégicos, sendo a castanheira uma das árvores de maior importância para a região Amazônica, visto que sua exploração resulta em relevantes benefícios sociais, econômicos e ambientais, movimentando uma economia que se encontra ligada diretamente a milhares de agricultores familiares e comunidades extrativistas da região (MYERS et al., 2000; WADT, et al., 2023).

A importância econômica e ecológica da castanha-do-brasil é notável, com uma longa história de coleta e uso pelos povos indígenas da Amazônia. Estudos arqueológicos indicam que as castanhas-do-brasil têm sido consumidas e comercializadas na região amazônica por milênios, evidenciando a importância da espécie para as comunidades locais (SMITH et al., 1992). Atualmente, sua significativa influência no setor regional, encontra-se relacionada com a grande quantidade de mão de obra envolvida em toda cadeia produtiva, que engloba desde a coleta da matéria-prima até

seu beneficiamento nas unidades de beneficiamento (VAZ PEREIRA e COSTA, 1981).

Sendo uma espécie de uso variado, proporciona para o ser humano diversos produtos de interesse comercial. Embora as amêndoas possuam o maior valor agregado, sendo consumidas principalmente *in natura*, Wadt et al. (2023) citam que a madeira da castanheira é de qualidade suficiente para o emprego no setor naval e de construção civil, e a casca da árvore é utilizada na calefação de barcos, enquanto a casca do fruto (ouriço) possui grande potencial para produção de carvão e geração de energia através de combustão.

Aproximadamente US\$ 450 milhões por ano são movimentados no mercado mundial da castanha-do-brasil (Brasil, 2020), sendo comercializada *in natura* e na forma do óleo vegetal extraído da amêndoa, o qual é constantemente empregado na formulação de cosméticos. O Brasil se destaca no comércio global como maior produtor desde a década de 60 (FAOSTAT, 2023) (Figura 3) e, apesar do significativo aumento da produção da castanha por parte da Bolívia ao longo dos últimos 60 anos, chegando a ultrapassar ou se igualar ao Brasil em alguns anos, a produção brasileira em 2021 ainda representou 45,7 % do total, ligeiramente a frente da Bolívia (44,9 %) (INC, 2022).

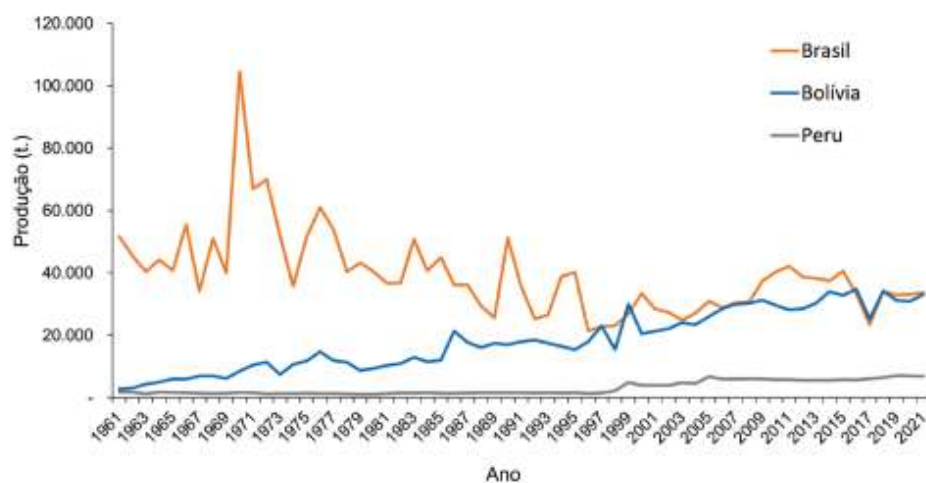


Figura 3. Histórico de produção (em toneladas) de castanha-do-brasil no Brasil, Bolívia e Peru, no período de 1961 a 2021. Fonte: Faostat (2023).

No Brasil, a castanha-do-brasil é obtida a partir do extrativismo vegetal e a produção nacional se concentra em três estados, que juntos somam 84,2 % de toda produção nacional, sendo o estado do Amazonas o maior produtor, atingindo 14,3 t em 2022, seguido do Acre (9,1 t) e Pará (8,8 t) (IBGE, 2024). Ao total, foram produzidas nacionalmente 38,2 t de castanha de acordo com o último censo agropecuário do IBGE. Conforme dados levantados por Observatório Castanha da Amazônia (OCA, 2023) um pouco mais da metade da produção brasileira de castanha-do-brasil fica no mercado interno (cerca de 55 %), enquanto cerca de 45 % são destinados à exportação.

Historicamente, a castanheira representa, principalmente nos Estados do Pará e Amazonas, o meio de sustento de milhares de famílias de coletores e coletoras, pois foi esta espécie a responsável por manter a economia destes estados após o declínio do ciclo da borracha, passando a constituir-se como o principal produto extrativo para exportação destas regiões (HOMMA e MENEZES, 2014). Sendo, portanto, fundamental para a segurança alimentar e nutricional economia e cultura de diversas localidades amazônicas, estima-se, de acordo com OCA (2023), que sua cadeia de valor envolva mais de 60 mil pessoas de povos e comunidades tradicionais da região que são diretamente dependentes desta.

Embora o cenário produtivo no Brasil seja bastante positivo, a espécie foi classificada desde 2008 pelo Ministério do Meio Ambiente como vulnerável a extinção, em decorrência do cenário de desmatamento da Amazônia (MMA, 2018). Homma e Menezes (2014), citam que a queda da produção nacional de castanha-do-brasil encontra-se relacionada com a forma de propagação da espécie associada aos danos ambientais ocasionados pela ação humana. Por ser alógama, é necessário que ocorra polinização cruzada; porém, os desmatamentos e queimadas destroem o habitat natural do agente polinizador da castanheira (Hymenoptero do gênero *Bombus* spp., conhecida como abelha mamangaba), resultando, conseqüentemente, na redução de indivíduos da espécie vegetal e redução da produtividade.

O contexto histórico da forte queda da produção e oferta nacional da castanha-do-brasil é mencionado por Santana et al. (1997) e Santana (2015). De acordo com os autores, diversos fatores como a abertura de estradas e implementação de grandiosos projetos agropecuários no Brasil a partir do ano

de 1979, a intensiva extração mineral e madeireira, a produção de energia e o programa de reforma agrária que visavam promover rápido crescimento econômico regional através da viabilização de crédito rural e incentivos fiscais, resultaram na destruição extensiva de castanhais. Estes fatores foram, portanto, responsáveis pela fase de declínio do ciclo da castanha, como pode ser observado na Figura 3.

Caracterizando-se como um dos principais recursos do extrativismo não-madeireiro florestal da região Amazônica, a castanha-do-brasil demonstra seu potencial, oferecendo serviços de regulação ambiental através da purificação do ar, da regulação climática, da manutenção da fauna e flora, da ciclagem de água e nutrientes, dentre outros benefícios (COSTANZA et al., 1997). A importância do manejo de Produtos florestais Não Madeireiros (PFNM) está justamente no fato de que não há necessidade de derrubada da árvore para sua exploração sendo, portanto, uma alternativa de conservação a qual a população (principalmente local) é beneficiada pelos serviços e produtos provenientes da espécie paralelamente a geração de renda com agregação de valor do uso florestal sustentável (GUEDES e SILVA, 2012).

Ainda que a castanheira-do-Brasil possua uma madeira de alta qualidade para construção, sendo demasiadamente cobiçada por madeireiros, a Instrução Normativa IBDF nº 001/80 proibiu seu abate ou corte (BRASIL, 1980). Segundo Wadt e Kainer (2009), suas sementes a torna tão relevante, que a espécie passou a ser considerada digna de proteção especial, tornando-se inclusive responsável pela proteção e manutenção de uma grande extensão de florestas tropicais, em decorrência do papel essencial que teve no processo de inclusão destas florestas no Sistema de Classificação das Áreas Protegidas da União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais (IUCN). Dentro deste sistema, as florestas foram incluídas na Categoria VI (áreas protegidas por recursos manejados), a qual objetificou legitimar reservas extrativistas como um modelo de conservação baseado na utilização dos recursos naturais de maneira sustentável.

Cadeia produtiva

O processo produtivo da castanha-do-brasil é composto por diversas etapas até o momento da comercialização deste produto, movimentando o comércio e empregando milhares de famílias da região amazônica. Segundo a normativa do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) nº11 de 22 de setembro de 2010, a cadeia produtiva da castanha-do-brasil se caracteriza como o “conjunto de processos relativos a esta matéria-prima constituído pelas etapas de catação, transporte, armazenamento, beneficiamento-processamento e comercialização” (BRASIL, 2010).

Os extrativistas se caracterizam como os primeiros autores da cadeia de valor, sendo estes povos e comunidades da Amazônia que, de acordo com Observatório Castanha da Amazônia (OCA, 2023), chegam a passar meses nas florestas durante a safra da castanha-do-brasil. Deste modo, de acordo com a normativa citada anteriormente, seguindo as boas práticas de produção, a primeira etapa da cadeia tem início com a coleta do ouriço (Figura 4), que ocorre após a sua queda, e estende-se até o armazenamento primário, fase em que os ouriços são geralmente armazenados na área do extrativista. Após esses processos, inicia-se a etapa de escoamento da produção de castanha com casca para a unidade beneficiadora.

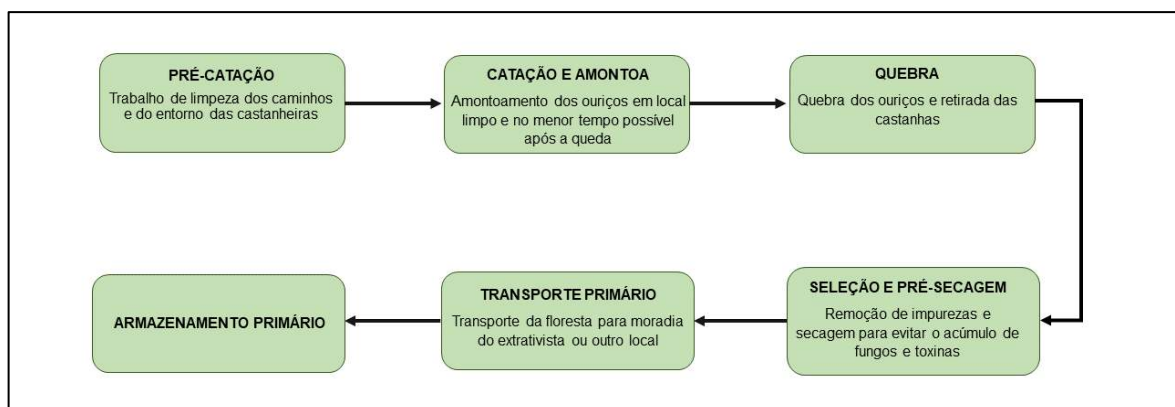


Figura 4. Fluxograma geral da etapa inicial da cadeia produtiva da castanha-do-brasil. Fonte: Adaptado de Brasil (2010).

De acordo com Fernandes (2016), em função do emprego de boas práticas de manejo, antes da distribuição das castanhas para as unidades beneficiadoras, é ideal que estas sejam conduzidas para uma espécie de armazém, onde passam por processo de secagem e armazenamento. Nas unidades beneficiadoras, que podem ser de gestão comunitária (cooperativa) ou privada (empresarial), realiza-se a retirada da casca e as castanhas são submetidas a diferentes processos conforme finalidade comercial, principalmente a castanha *in natura* ou seu óleo obtido por prensagem.

O fluxograma da Figura 5 foi construído a partir de conversas com os cooperados da COOPAVAM, e traz uma ideia geral de todas as etapas de beneficiamento das castanhas na unidade. Ressalta-se que, no caso da cooperativa em questão, as castanhas recebidas não passam por nenhum tratamento prévio, somente a remoção do interior do ouriço, que é realizada na floresta.

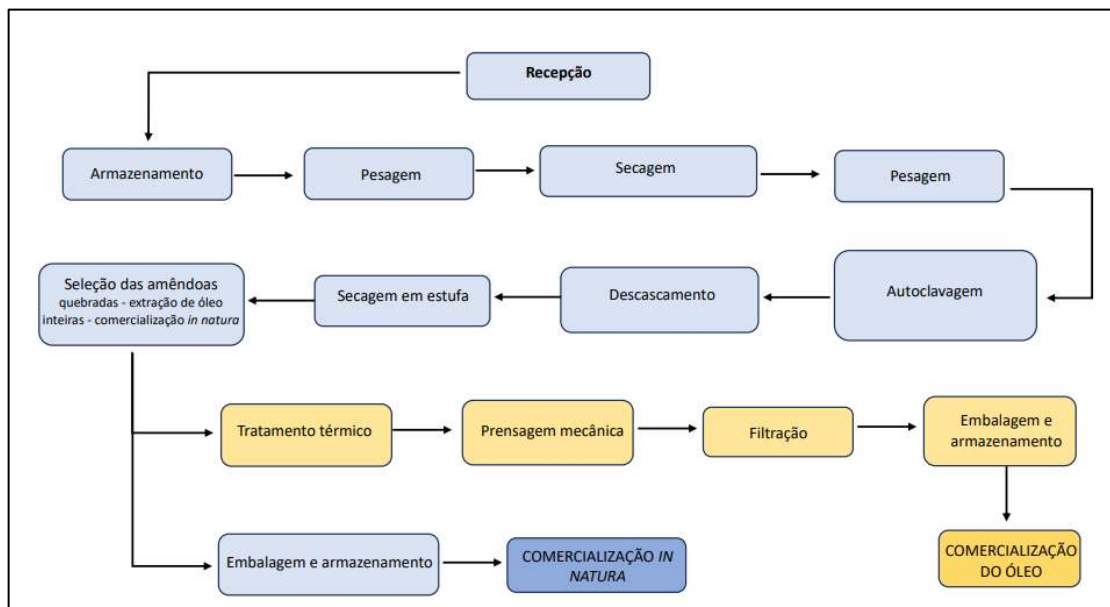


Figura 5. Fluxograma do beneficiamento das castanhas-do-Brasil pela Cooperativa dos Agricultores do Vale do Amanhecer (COOPAVAM), Juruena/MT. Fonte: Autor.

A produção da castanha-do-brasil possui uma série de atributos socioambientais fundamentais no que diz respeito a manutenção das florestas. Entretanto, de acordo com a OCA (2023), a cadeia sofre com obstáculos desde a etapa de coleta do material, que ocorre no interior da floresta em locais muitas vezes de difícil acesso.

Pelo fato de a cadeia ser formada por diversos elos até a chegada ao consumidor final, englobando atravessadores, unidades de beneficiamento, transformação e processamento, atacadistas e varejistas, a cooperação e coordenação entre estes é frequentemente insuficiente. Deste modo, tem-se que a produção da castanha nacional, de maneira geral, caracteriza-se como pulverizada, apresentando grande insegurança fundiária das áreas de coleta, tendo constante presença de atravessadores e intermediários, com dificuldades logísticas, carente de padronização do produto, tendo demanda instável e significativa oscilação de preço (OCA, 2023).

Além destes fatores, a cadeia produtiva da castanha-do-brasil conta com pouco desenvolvimento tecnológico que, de acordo com Almeida (2015), resulta da divisão científica que se dá entre o extrativismo e cultivo desta espécie. Ou seja, pesquisas direcionadas a domesticação e desenvolvimento da planta se apresentam em grande quantidade, enquanto a cadeia produtiva ainda conta com restritos recursos técnicos e com boas práticas muitas vezes rudimentares, tendo emprego de inadequada manipulação e processamento, o que facilita a contaminação microbiológica e consequentes perdas econômicas em função da qualidade do produto final.

Em face da ampla produção e comercialização nacional e internacional da castanha, Castro (2017) ressalta que sua cadeia produtiva carece de mais dados quantitativos e qualitativos acerca do processamento pós-colheita adequado desta matéria-prima.

Secagem de alimentos

O processo de secagem é uma das operações de conservação de alimentos mais antigas e mais empregadas na indústria, pois reduz a atividade da água e, conseqüentemente, a sobrevivência dos microrganismos e a deterioração por atividade enzimática (PHUON et al., 2021), além de reduzir o custo de embalagem e transporte (OLIVEIRA et al., 2015) podendo, ainda, contribuir para o aumento da solubilidade do produto e sua incorporação em diferentes formulações.

Existem diversos métodos de secagem, sendo que os parâmetros de processo dependem da adequação ao material. A secagem ao sol é uma das técnicas de menor custo. No entanto, pode gerar resultados insatisfatórios em termos de qualidade do produto (MONISHA e LOGANATHAN, 2022), além de ser de difícil controle e o produto ficar exposto a intempéries.

A secagem com ar quente já é um método bem estabelecido, porém a exposição do produto ao calor pode degradar alguns compostos termossensíveis (BAO et al., 2022). Por outro lado, o emprego de baixas temperaturas pode garantir maior qualidade do produto, mas demanda longo tempo de processo e maior consumo de energia em comparação às técnicas de secagem com calor (LLAVATA et al., 2020). Embora o emprego de ar aquecido seja o processo de secagem mais convencional, esta operação ainda necessita de padronização de temperatura, tempo de exposição e movimentação do material, sendo que estes parâmetros podem variar dependendo da qualidade ou procedência do material.

De acordo com Gonçalves (2015), as mudanças ocasionadas em alimentos estão relacionadas ao seu beneficiamento, seja no processo de fabricação de novos produtos, ou durante a secagem ou desidratação, que é capaz de promover alterações na composição química ou físico-química. Além de proporcionar diversificação e modificação de produtos já disponíveis, Alves e Nicoletti (2016) ressaltam que os processos de secagem, quando empregados adequadamente, são capazes de manter preservadas determinadas características de um alimento por longos períodos, mesmo quando armazenados em temperatura ambiente.

Em teores de água elevados, que ultrapassam aqueles recomendados para que o produto seja armazenado de forma segura, observa-se contaminação e deterioração microbiológica (SILVA et al., 2016). Por outro lado, em teores de água demasiadamente reduzidos, é verificado o aumento dos processos oxidativos (SALINAS, 2002).

No que diz respeito a manutenção das características sensoriais e nutricionais, as particularidades da composição dos alimentos influenciam na definição de parâmetros ótimos de processos de secagem. É imprescindível, por exemplo, o conhecimento dos teores mínimos e máximos de água para alimentos que sejam constituídos por grande quantidade de lipídios. Desta forma, em oleaginosas como a castanha-do-brasil, a oxidação dos lipídios é provocada tanto pela alta, quanto pela baixa quantidade de umidade (DOYMAZ e PALA, 2003; ARAÚJO, 2015). De uma forma geral, a secagem é normalmente empregada antes da etapa de extração de lipídios. Marques (2006) cita que o rompimento das membranas celulares pode ser induzido pelo aumento da temperatura no processo de secagem propiciando, desta forma, o escoamento do óleo e acarretando maiores teores obtidos e menor custo de produção.

Além da composição, segundo Mesquita et al. (2016), para secagem de produtos de origem vegetal de forma geral, deve-se considerar seu grau de maturidade fisiológica, visto que o teor de água pode variar consideravelmente em função de sua maturação e influenciar o tempo e a temperatura do processo de secagem aplicado. Tais fatores determinam a qualidade final do alimento seco (FIB, 2016) como cor, textura, aparência, sabor e retenção de nutrientes desejados. Park et al. (2006) citam que quando conduzida de forma inadequada, a secagem pode resultar não somente em alterações indesejadas de cor e sabor, como também na perda de componentes voláteis e termossensíveis, afetando as características sensoriais e nutricionais de modo geral de um alimento.

A transferência de calor no processo de secagem pode acontecer via convecção, condução e radiação, sendo a método mais utilizado a convecção forçada do ar aquecido sobre uma camada de um determinado produto. Conforme relatado por Moraes (2000), este método proporciona a transferência da água superficial para o ar, e da água de partes internas para

a superfície do produto. Estes dois processos ocorrem de forma simultânea e são decorrentes do gradiente hídrico existente entre essas regiões.

O exato momento em que um produto atinge o teor de água desejado pelo processo de secagem é possível ser determinado através de uma curva que relaciona o tempo de secagem (h) com o teor de umidade (x), conhecida como cinética de secagem. Tais características de um determinado se referem à velocidade com que um alimento perde umidade, que é controlada pelas características da matriz do alimento, bem como pela temperatura utilizada, umidade relativa e velocidade do ar de secagem (CELESTINO, 2010).

De uma maneira geral, é possível observar um padrão no comportamento de um sólido submetido a um processo de secagem sob condições fixas de temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Uma outra maneira muito comum para se analisar este processo nos estudos de cinética de secagem é através da curva de Taxa de secagem, que relaciona a umidade (x) com a fluxo de secagem (massa de água removida em relação ao tempo e área de secagem - $\text{kg}/\text{h}\cdot\text{m}^2$).

Na Figura 6a, Foust et al. (1982) apresentam o comportamento geral do teor de umidade no sólido (em base seca) durante a secagem, ou diferentes estágios de secagem que são observados ao longo do tempo, enquanto a Figura 6b representa os diferentes comportamentos da taxa de evaporação de água em função do teor de umidade do produto. Em ambos os casos, a umidade do material é sempre expressa em base seca (kg de água/ kg de sólido seco).

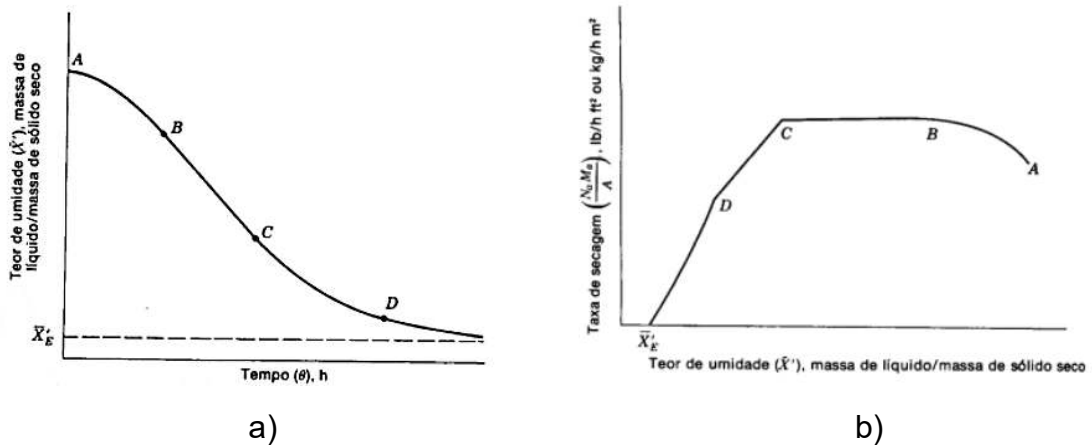


Figura 6. a) Teor de umidade presente no sólido em função do tempo de secagem, b) Taxa de secagem em função do teor de umidade no sólido. Fonte: FOUST et al. (1982).

Inicialmente, nos segmentos A e B, o alimento se adapta as condições de secagem estabelecidas, podendo ocorrer evaporação da água livre. Já entre os pontos B e C, é possível observar que a taxa de secagem apresenta valor constante e máximo, indicando que neste período a difusão da água no interior do material se iguala a quantidade de água que é evaporada na superfície (FOUST et al., 1982). Em outras palavras, a água removida da superfície do sólido é, imediatamente, substituída pela água proveniente do interior, o que mantém a taxa de secagem constante e máxima. De acordo com Geankoplis (1998), este segmento que representa o período de secagem constante possui maior duração em alimentos que contenham umidade mais elevada.

A secagem a partir do ponto C é caracterizada por um decréscimo na velocidade de evaporação, resultante do aumento da resistência da movimentação da umidade interna do sólido para a superfície. Este decréscimo se estende até o ponto D, onde se inicia o segundo período de taxa de secagem decrescente até que o sólido alcance sua umidade de equilíbrio, ponto em que é cessado o processo de secagem, indicando que a pressão parcial do vapor de água sobre o sólido se iguala à pressão parcial do vapor de água presente no ar (GEANKOPLIS, 1998).

Conforme relatado por Corrêa et al. (2003), o estudo do processo de secagem fornece informações fundamentais para o projeto e operação de sistemas de secagem e secadores adequados para um determinado alimento/produto por meio do comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa entre o material e o ar atmosférico.

Atividade de água e isotermas de sorção

A água é de um dos principais componentes dos alimentos que possui grande influência na conservação em função de sua disponibilidade. De acordo com Labuza et al., (1970), a água pode estar presente nos alimentos em três formas diferentes, sendo elas: água livre, água adsorvida e água ligada. A água livre, também denominada de água disponível ou não ligada, refere-se àquela que se encontra geralmente na superfície externa do alimento, nos espaços intergranulares e entre os poros de um determinado material, sendo eliminada ou acessada facilmente. A água livre propicia reações químicas e enzimáticas e favorece o crescimento de microrganismos.

A água adsorvida, é aquela que se encontra presente como uma camada muito fina nas superfícies tanto externas quanto internas de macromoléculas como amido, celulose, pectinas e proteínas, ligando-se a estas, através de forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio. Já a água ligada ou combinada se apresenta fortemente ligada ao substrato e associada quimicamente a substâncias do alimento estando, portanto, não disponível para o desenvolvimento de microrganismos e apresentando maior dificuldade de remoção. Leung (1981) cita que uma de suas propriedades mais importantes é que não é congelável, além de possuir alta energia de ligação, baixa pressão de vapor e não estar disponível como solvente.

Qualquer que seja o método de beneficiamento ou industrialização empregado, em todos os alimentos há presença de água, seja em menor ou maior proporção, o que influencia a rapidez das reações químicas e enzimáticas durante o armazenamento. Neste contexto, é demasiadamente relevante o conhecimento do teor e disponibilidade de água presente no

alimento para o controle de sua taxa de deterioração (FELLOWS, 2006; IAL, 2008).

Deste modo, tem-se que a medida usualmente empregada para expressar a estabilidade de um produto é o conceito de Atividade de Água (a_w). Este parâmetro indica a intensidade das forças que unem a água na associação com constituintes não aquosos, influenciando a proliferação de microrganismos e reações hidrolíticas. A a_w é a determinação do nível de água em sua forma livre (CECCHI, 2003), sendo descrita como a relação entre a pressão parcial da água contida no produto (P) e a pressão de vapor de água pura (P_0) na mesma temperatura (Equação 1).

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (\text{Eq. 1})$$

O valor de atividade de água pode variar entre 0 e 1, sendo o valor máximo atingido apenas na água pura (COUTO, 2015). A interação entre a preservação dos alimentos e a_w pode ser melhor compreendida através da Figura 7, a qual mostra que a maioria das reações apresentam redução em suas velocidades em valores menores de a_w , sendo praticamente inibidas quando o produto atinge $a_w \leq 0,2$. Uma exceção é a oxidação lipídica, que passa por um mínimo e logo após sofre rápida elevação a partir de $a_w \approx 0,3$ (VAN DEN BERG e BRUIN 1981).

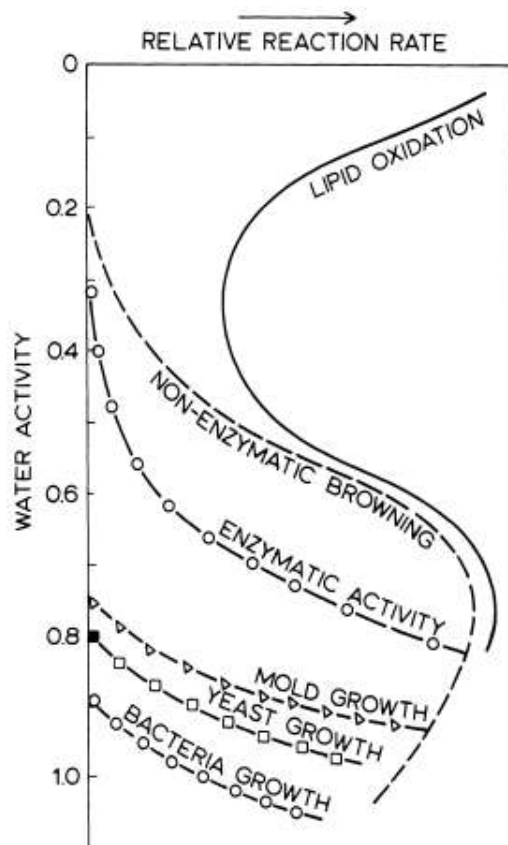


Figura 7. **Relação entre a atividade de água (aw) e velocidade relativa das reações de deterioração em alimentos. Fonte: Labuza (1975).**

Os microrganismos (bactérias, leveduras e bolores), possuem comportamentos variáveis em relação a a_w . Observa-se que as bactérias apresentam geralmente maior exigência quanto à disponibilidade de água livre, seguidas de leveduras e bolores. Labuza (1980) cita que apenas quando a a_w apresentar valores inferiores a 0,60, um alimento pode ser considerado estável quanto à deterioração por microrganismos.

O aumento crítico da a_w culmina, portanto, em rápido crescimento destes organismos indesejados, demandando em muitos alimentos o uso de conservantes químicos, como alertado por Damodaran e Parkin (2019), ou outros processamentos específicos. Da Silva e Marsaioli Junior (2004), ao avaliarem a a_w de castanha-do-brasil, obtiveram valores na faixa de 0,79 - 0,91 para o material *in natura*. Estes valores indicariam, portanto, uma demanda por implementação e manutenção de processos tecnológicos,

principalmente, de secagem, que visem redução a níveis seguros da aw desta matéria-prima para o seu adequado processamento, armazenamento e comercialização.

Por conseguinte, através do controle da aw é possível: reduzir ou evitar reações de escurecimento não-enzimático e de oxidação lipídica, prolongando a atividade de vitaminas e enzimas; avaliar quais microrganismos podem se apresentar como agentes de potenciais deteriorações; preservar a estabilidade química dos alimentos; aprimorar as propriedades físicas do alimento de modo geral. Para tais, o estudo da aw pode ser realizado através das isotermas de sorção, que são curvas de equilíbrio higroscópico obtidas por meio de processos de adsorção e dessorção de água (umidade) de um determinado produto a uma certa temperatura.

As isotermas de sorção variam de produto para produto, e esta característica se deve ao fato das diferentes interações que ocorrem entre a composição química e seus respectivos teores de umidade (MELO FILHO e VASCONCELOS, 2011). Deste modo, as isotermas de sorção fornecem a informação do conteúdo de água retido por um alimento de acordo com a umidade relativa do ambiente em que este se encontra em equilíbrio, para uma determinada pressão e temperatura (Figura 8). Neste estudo, é muito comum o fenômeno de histerese, que se trata da diferença entre as curvas de adsorção (reincorporação de água) e dessorção (remoção de água).

Labuza (1968) descreve o efeito de histerese como característico da região de condensação capilar, com a possibilidade de se estender até a região de multicamadas e, em casos raros, até a região da monocamada. Para explicar a histerese, várias teorias têm sido propostas, incluindo condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase. No entanto, uma explicação definitiva para o fenômeno ainda não foi encontrada. Kaminski e Kudra (2000) sugerem que a histerese pode ser usada para estimar a probabilidade de deterioração de alimentos devido a reações químicas e microbiológicas. Além disso, Fellows (2006) enfatiza a importância da histerese na determinação das medidas de proteção necessárias contra o ganho de água.

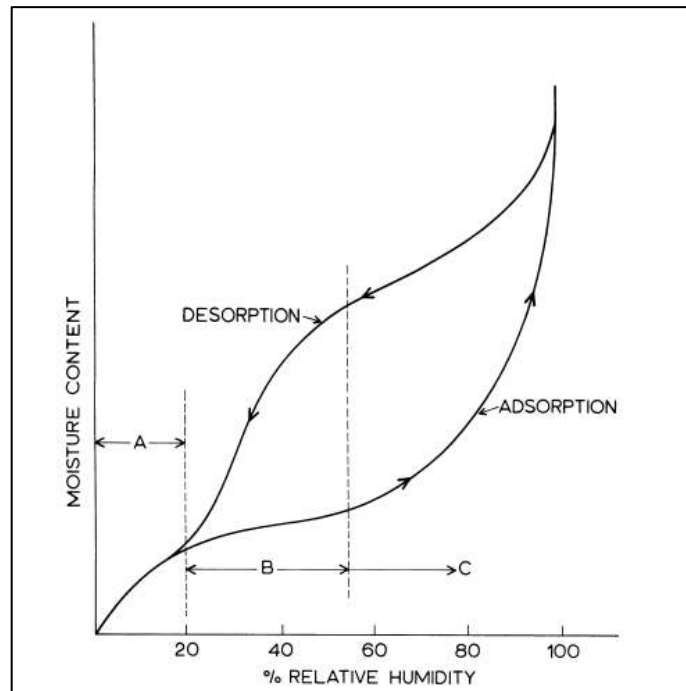


Figura 8. **Isotermas de sorção típica de um alimento mostrando a histerese.**
Fonte: Labuza, 1975.

Ordóñez (2005) e Pereda et al. (2005) citam que a umidade relativa do ambiente no qual um produto se encontra e a a_w tendem a se equilibrar, sendo, portanto, comum ser expressa como umidade relativa de equilíbrio (URE, %), onde $a_w = \text{URE}/100$.

Observa-se que o comportamento das isotermas de alimentos é basicamente dividido em três regiões ou zonas (a, b e c) (Figura 8), onde as propriedades da água associadas a cada região diferem significativamente. Sendo assim, a primeira região ou “zona a” representa a monocamada de água, considerada a mais fortemente ligada e de menor mobilidade, onde há presença de fortes ligações de hidrogênio; a segunda região ou “zona b” corresponde àquela de transição, onde multicamadas de água estão presentes, sendo as ligações de hidrogênio nestas mais fracas que as da monocamada; e a terceira região ou “zona c” corresponde àquela constituída por água livre, estando disponível como solvente para desenvolvimento de microrganismos e atividade enzimática (MUJUMDAR, 1995; AIRAKSINEN, 2005; DAMODARAN et al., 2010).

Tipos de isotermas de sorção

A curva que relaciona o teor de umidade de um produto (expresso como massa de água por massa de matéria seca) e a correspondente a_w a uma determinada temperatura pode apresentar diferentes formatos. Brunauer et al. (1940) classificaram as isotermas de sorção de acordo com sua forma e estabeleceram cinco diferentes tipos, conforme representado na Figura 9.

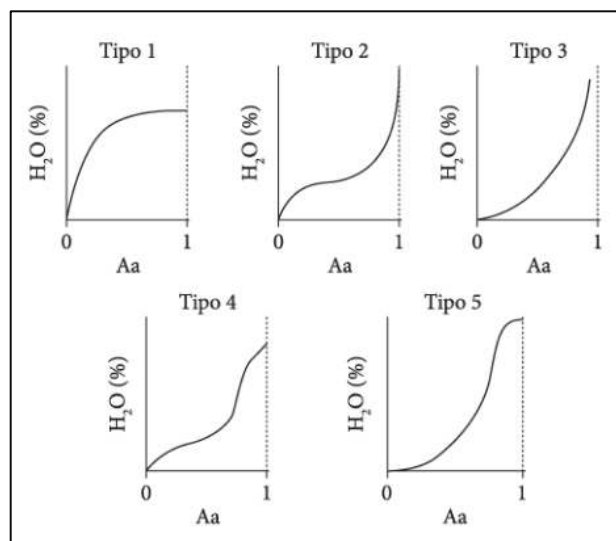


Figura 9. **Representação dos cinco tipos de isotermas de sorção descritos por Brunauer et al. (1940), onde H_2O (%) é a porcentagem mássica de água em base seca e Aa é Atividade de água (a_w). Fonte: Mathlouthi e Rogé, 2003.**

De acordo com Ferreira e Pena (2003), a forma dessas curvas revela o tipo de forças que atuam na ligação da água à superfície do material higroscópico. Isso permite avaliar a estrutura superficial e a estabilidade do material durante o armazenamento, além de possibilitar o planejamento de embalagens adequadas para melhor conservação.

As isotermas do Tipo II (2) têm a forma de “S”, com formato sigmoide e são frequentemente determinadas em tipos distintos de alimentos, como por exemplo, em fontes amiláceas, frutas, legumes, sementes e até mesmo em

castanhas, de acordo com Yanniotis e Blahovec (2009). Isto se confirma o resultado obtido por Chisté et al. (2012), que ao realizarem o estudo do comportamento higroscópico de amêndoas de castanhas-do-Brasil a 25 °C, na faixa de atividade de água (a_w) de 0,29 a 0,96, constataram isoterma de adsorção do Tipo II (Figura 10).

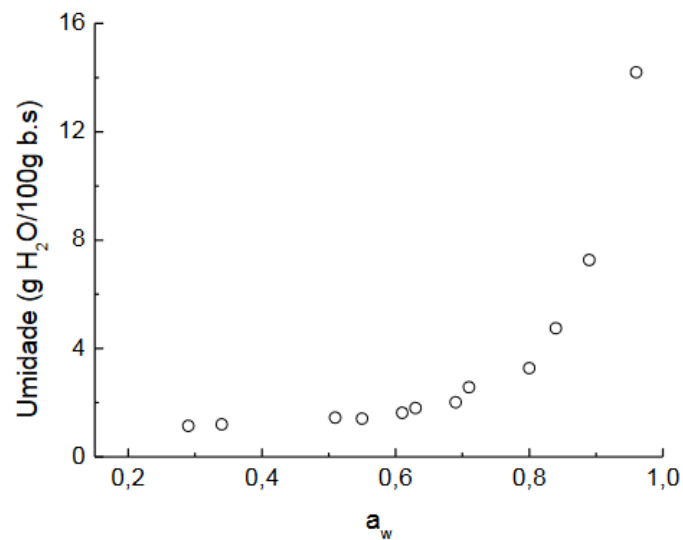


Figura 10. **Isoterma de adsorção da castanha-do-brasil a 25 °C. Fonte: Chisté et al. (2012).**

Lima (2007) cita que a parte inicial da isoterma do Tipo II até o ponto de inflexão corresponde à formação da monocamada e que, a partir desse ponto, passa a ocorrer a adsorção de camadas adicionais de moléculas de água sobre a monocamada já formada.

De acordo com Teixeira et al. (2001) a isoterma do Tipo II (sigmoide) se caracteriza como resultante da adsorção em sólidos microporosos e não porosos, apresentando um aumento acentuado na quantidade de água na forma de vapor adsorvido em baixas pressões relativas, que se torna mais gradual em valores intermediários de a_w . Esse comportamento ocorre devido à forte interação das primeiras moléculas de vapor de água com os sítios mais ativos do sólido. À medida que esses sítios são preenchidos, o vapor de água

começa a interagir com áreas de menor energia, o que é refletido na diminuição da inclinação na região central da isoterma. Na parte final da curva, observa-se um aumento acentuado da quantidade de vapor de água adsorvido em função da pressão relativa, indicando, como mencionado anteriormente, o início da formação de camadas múltiplas e a subsequente condensação.

Determinação de isotermas de sorção

As formas e as posições das isotermas de sorção são determinadas por diversos fatores, incluindo a composição e estrutura física da amostra, a temperatura e a metodologia utilizada. Portanto, como cada alimento apresenta características distintas de sorção de umidade, é necessário determinar experimentalmente as isotermas de sorção específicas para cada tipo de produto (BRUNAUER et al., 1938).

A construção das isotermas de sorção de um material pode ser realizada medindo a variação da umidade do material ou do meio em que este se encontra, através de métodos higrométricos e gravimétricos. No método higrométrico, o teor de umidade do material é mantido constante até que o ar circundante atinja um valor constante de equilíbrio, sendo feita a medição da a_w através de um higrômetro ou manômetro. Já no método gravimétrico, a temperatura do ar e a a_w são mantidas constantes até que o teor de umidade da amostra atinja o valor de equilíbrio (MOREIRA, 2000).

O método gravimétrico, é considerado o método padrão para a determinação de isotermas de sorção, e consiste em colocar o material em ambientes com umidades relativas e temperaturas conhecidas e constantes até atingir o equilíbrio termodinâmico. Na prática, o equilíbrio é verificado quando a massa da amostra permanece constante, momento em que a a_w da amostra corresponde à umidade relativa do ambiente, permitindo determinar o teor de umidade da amostra para obter o ponto a_w em relação à umidade (SPEISS e WOLF, 1987; DAMODARAN et al., 2010).

Esse método (gravimétrico) pode ser empregado com ar circulado (método dinâmico) ou com ar estagnado (método estático) sendo, de acordo com Moreira (2000), o tempo para que o produto entre em equilíbrio menor no método dinâmico. Entretanto, o método estático possui vantagens como a obtenção de condições termodinâmicas constantes com maior facilidade e a possibilidade de uso de soluções ácidas ou salinas saturadas (OLIVEIRA, 2006).

O método gravimétrico estático se caracteriza, portanto, como aquele em que a difusão é o único meio de transferência de massa entre o produto e o ar circundante. A umidade relativa do ar é comumente fixada pelo contato com uma solução salina saturada, na qual a a_w a uma determinada temperatura é conhecida. Este método é amplamente utilizado para a determinação de isotermas de sorção de produtos alimentícios (TALLA et al., 2005; YAZDANI et al., 2006; BRETT et al., 2009; SINGH et al., 2011), sendo inclusive recomendado pelo projeto COST 90 (WOLF et al., 1985). Embora seja considerado muito preciso, este método apresenta o inconveniente de demandar um tempo considerável para a obtenção completa das isotermas, geralmente de 20 a 30 dias para cada temperatura (SPEISS e WOLF, 1987; DAMODARAN et al., 2010).

A precisão na determinação das isotermas de sorção é fundamental para o controle de qualidade e estabilidade dos alimentos durante o armazenamento (AL-MUHTASEB et al., 2002). A compreensão detalhada das isotermas de sorção ajuda a garantir que os alimentos mantenham suas propriedades desejáveis e evite a deterioração, proporcionando uma base sólida para estratégias eficazes de secagem (dessorção) e armazenamento (adsorção).

Modelos matemáticos para ajustes de isotermas de sorção

Os valores experimentais de isoterma de sorção são utilizados para o ajuste de curvas a partir de diferentes modelos matemáticos, os quais têm sido propostos ao longo do tempo. Entretanto, de acordo com Lang e

Steinberg (1981), grande parte dos modelos existentes, empíricos, semiempíricos ou teóricos, demonstram precisão em intervalos limitados de a_w ou para alguns tipos de alimentos específicos.

O modelo de Brunauer, Emmet e Teller (BET) desenvolvido em 1938, é considerado o pioneiro. Todavia, o modelo de GAB criado por Guggenheim, Anderson e De Boer em 1985 é considerado, de maneira geral, um dos melhores para ser ajustado aos dados experimentais (DAMODARAN et al., 2010).

A Tabela 2 apresenta uma compilação dos principais modelos matemáticos de isotermas de sorção utilizados com suas respectivas equações de ajuste. As equações diferem entre si basicamente em relação a quantidade de parâmetros a serem ajustados e a dependência destes parâmetros com a temperatura.

Chowdhury et al. (2006) afirmam que, embora diversos modelos matemáticos tenham sido aplicados para descrever isotermas de sorção de água em diferentes materiais alimentares, nenhum deles consegue prever com precisão as isotermas de umidade em toda a faixa de a_w e para todos os tipos de alimentos. Essa dificuldade é corroborada por Al-Muhtaseb et al. (2002), que revisaram as características de sorção de umidade em produtos alimentícios e discutiram a aplicabilidade de vários modelos matemáticos. Os autores apontam que, devido à complexidade da composição e estrutura dos alimentos, a previsão matemática do comportamento de sorção é desafiadora. É ressaltado por Mulet et al. (2002) a existência de mais de 200 modelos matemáticos na literatura que são capazes de descrever o fenômeno de equilíbrio higroscópico.

Entre os modelos mais frequentemente utilizados estão as equações de GAB, BET, Henderson, Oswin e Peleg (KAYA e KAHYAOGLU, 2007). De acordo com Van den Berg e Bruin (1981) e Bell e Labuza (2000), esses modelos são amplamente empregados devido à capacidade em descrever com precisão a relação entre a_w e o teor de umidade em diversos tipos de alimentos.

O modelo de GAB se destaca por ser considerado o mais versátil disponível na literatura, devido à sua capacidade de representar isotermas em uma ampla faixa de umidade sendo, portanto, adotado por vários

pesquisadores (Al-Muhtaseb et al. 2004). É importante destacar que a equação de GAB, recomendada pelo European Project COST 90, é considerada a equação fundamental para caracterizar a sorção de água em alimentos e para descrever suas propriedades físicas (LABUZA et al., 1985; TIMMERMANN et al., 2001).

Tabela 2. Modelos matemáticos comumente utilizados para ajuste de isotermas de sorção.

Modelos	Equações*	Parâmetros
BET (Brunauer et al., 1938)	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot aw}{(1-aw) \cdot [1+(C-1) \cdot aw]}$	X_m, C
Chung-Pfost (Chung & Pfost, 1967)	$\ln(aw) = -A \cdot \exp(-B \cdot X_{eq})$	A, B
GAB (Van den Berg, 1985)	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot aw}{[(1-K \cdot aw) \cdot (1-K \cdot aw + C \cdot K \cdot aw)]}$	X_m, C, K
Halsey (Halsey, 1948)	$\ln(aw) = \left(\frac{-A}{X_{eq}^B}\right)$	A, B
Henderson (Henderson, 1952)	$(1 - aw) = \exp(-A \cdot X_{eq}^B)$	A, B
Oswin (Oswin, 1946)	$X_{eq} = A \cdot \left(\frac{aw}{1-aw}\right)^B$	A, B
Peleg (Peleg, 1993)	$X_{eq} = k_1 \cdot a_w^{n_1} + k_2 \cdot a_w^{n_2}$	k_1, k_2, n_1, n_2
Smith (Smith, 1974)	$X_{eq} = A + (B \cdot \log(1 - aw))$	A, B
D'arcy-Watt (D'arcy e Watt, 1970)	$X_{eq} = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot aw}{1 + K_1 \cdot aw} + K_5 \cdot aw + \frac{K_3 \cdot K_4 \cdot aw}{1 + K_3 \cdot aw}$	K_1, K_2, K_3, K_5
Kuhn (Kuhn, 1967)	$X_{eq} = \left(\frac{C}{\ln aw}\right) + k$	C, k
Harkins (Harkins e Jura, 1943)	$X_{eq} = \exp\left[\frac{a - (b \cdot T)}{c - \ln(aw)}\right]$	a, b, c, T
Copace (Corrêa et al., 1995)	$X_{eq} = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot aw)]$	a, b, c, T
Sigma-Copace (Corrêa et al., 1998)	$X_{eq} = \exp[a - (b \cdot T) + c \cdot \exp(aw)]$	a, b, c, T

* X_{eq} e X_m são, respectivamente, os teores de umidade de equilíbrio e de monocamada, em kg água/kg amostra seca; aw é a atividade de água e T é temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Alguns dos modelos considerados “clássicos” na predição de isotermas de sorção, como apresentados na Tabela 2, também são muitas vezes empregados em suas formas modificadas. Por exemplo, modelos como GAB e BET são frequentemente modificados para incluir termos adicionais ou

ajustar parâmetros, permitindo uma representação mais precisa das isotermas de sorção em alimentos com características higroscópicas complexas (SAHIN e SUMNU, 2006). As modificações dos modelos matemáticos já existentes são, portanto, realizadas com intuito de melhorar a precisão dos ajustes e a previsibilidade dos modelos. Tais modificações são baseadas em extensivos trabalhos experimentais e teóricos que identificam limitações nos modelos clássicos e propõem melhorias a fim de permitir que os modelos se tornem mais universais e aplicáveis a uma gama maior de materiais e condições de temperatura e umidade (IGLESIAS e CHIRIFE, 1976).

De acordo com Corrêa et al. (2015), melhor se caracteriza o ajuste do modelo aos dados experimentalmente observados, quanto mais reduzidas as magnitudes de determinados índices forem. Ou seja, a qualidade do ajuste de um modelo matemático aos dados experimentais é avaliada pela magnitude de índices empregados, como o erro médio relativo (P) e o qui-quadrado (χ^2). Quanto menores esses índices, melhor o modelo representa os dados observados. Ademais, valores residuais em torno de zero indicam que as previsões do modelo estão muito próximas dos valores experimentais, o que caracteriza um modelo matemático como ideal para ajuste de dados de isotermas de sorção.

Existem poucos estudos científicos focados nas isotermas de sorção especificamente para a castanha-do-brasil, e os disponíveis, além de não estudarem o comportamento higroscópico deste material com casca, apresentam variações nos resultados e nas recomendações dos modelos matemáticos para isotermas de adsorção e dessorção. Chisté et al., (2012), realizaram estudo do comportamento higroscópico de amêndoas de castanha-do-brasil a 25 °C na faixa de a_w de 0,29 a 0,96, e constataram que as equações de Kuhn, Halsey, GAB, BET e BET modificada foram capazes de prever a isoterma de adsorção do material.

Já para isotermas de dessorção, um estudo realizado por Bitencourt (2020), avaliou o comportamento higroscópico das amêndoas através de método estático a 10, 20, 30 e 40 °C, com valores de a_w variando de 0,30 a 0,91 e constatou que os modelos de Halsey modificado, Harkins, Sigma-copace, Oswin Modificado e GAB modificado apresentaram bons ajustes, com

destaque para o modelo de Sigma-copace, que apresentou menor valor de P e X^2 .

Entretanto, na determinação de isotermas de adsorção e dessorção de amêndoas de castanhas-do-brasil, em estudo realizado por Botelho et al. (2019), pelo método estático nas temperaturas de 25, 35, 45 e 55 °C e faixa de a_w de 0,10 a 0,80 é relatado que este modelo (Sigma Copace) não pode ser utilizado na representação das curvas deste material por apresentar ajuste com tendenciosidade na distribuição dos resíduos, critério este de análise que não foi adotado por Bitencourt (2020) por, segundo o autor, apresentar subjetividade na análise e interpretação dos resultados. Ademais, o trabalho de Botelho et al. (2019) considera que modelos Copace, Henderson e Oswin são os que melhor descrevem a higroscopicidade das sementes de castanheira-do-Brasil, tanto na adsorção quanto na dessorção.

As diferenças nas recomendações dos modelos para a castanha-do-brasil podem ser atribuídas às condições experimentais distintas, como temperatura e umidade relativa, às especificidades do produto, como composição química integridade física e permeabilidade do tegumento, além de diferentes métodos e critérios de avaliação. Esses fatores influenciam a precisão e a aplicabilidade dos modelos matemáticos, resultando em diferentes preferências e conclusões nos estudos.

Isotermas de sorção e textura de alimentos

As isotermas de sorção são ferramentas essenciais para entender e prever mudanças texturais em função da a_w (BOURNE, 1987). Geralmente, durante o consumo, os alimentos possuem a_w superior a 0,8. Essa característica garante que os alimentos estejam macios e úmidos, o que facilita a mastigação. Entretanto, alimentos com elevada a_w correm o risco de proliferação de microrganismos. Por outro lado, se a a_w for reduzida excessivamente, impedindo o desenvolvimento microbiano, o alimento pode se tornar desagradável ao paladar.

A Figura 11 ilustra a relação entre o teor de umidade e a_w em diferentes regiões, destacando as propriedades texturais associadas a cada faixa de umidade. Essa relação é fundamental para entender como as isotermas de sorção podem ser utilizadas para prever a estabilidade e algumas características sensoriais de alimentos.

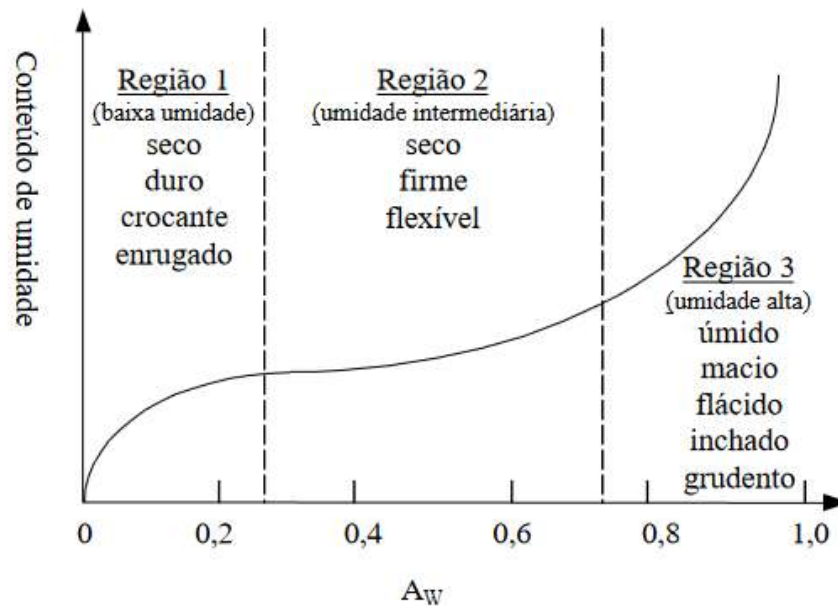


Figura 11. **Textura dos alimentos como função da atividade de água (a_w).** Fonte: **BOURNE, 1987.**

Na região de baixa umidade (Região 1), onde a a_w é inferior a 0,2, os alimentos tendem a ser secos, duros, crocantes e enrugados. Alimentos com menor a_w são mais secos e, portanto, mais rígidos e quebradiços. A manutenção de uma baixa a_w é essencial para evitar reações químicas indesejáveis e a deterioração microbiológica. (MADAMBÁ et al., 2007). Entretanto, manter o alimento com a_w muito reduzida também pode gerar efeitos negativos ao produto. É de conhecimento que valores abaixo de 0,2 aumentam significativamente reações de rancidez oxidativa, como relatado por Labuza (1975).

À medida que a a_w aumenta para a região intermediária (Região 2), entre 0,2 e 0,6, os alimentos permanecem secos, mas tornam-se mais firmes e flexíveis. Nesta faixa, a água adsorvida começa a influenciar a textura dos alimentos, tornando-os menos quebradiços. Já na região de alta umidade (Região 3), com a_w superior a 0,6, os alimentos se tornam úmidos, macios, flácidos, inchados e grudentos. Sarantópoulos, (2001) enfatiza a importância de controlar a a_w para evitar a deterioração microbiológica e de textura, que podem ocorrer rapidamente em condições de alta umidade.

Segundo Szczesniak (2002), a textura dos alimentos envolve a expressão sensorial e funcional das propriedades estruturais, mecânicas e superficiais, discernidas pelos sentidos da visão, audição, tato e cinestesia. Estando de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1993), que se refere a textura como fator que abrange todas as características reológicas e estruturais, incluindo aspectos geométricos e de superfície, perceptíveis por receptores mecânicos, táteis e, ocasionalmente, visuais e auditivos.

A classificação dos termos de textura para sólidos e semissólidos resultou na adoção do método de perfil de descrição da textura (*Texture Profile Analysis* - TPA), que é aplicável tanto para medidas sensoriais quanto instrumentais (BOURNE, 1987). Os métodos instrumentais de análise de textura avaliam propriedades mecânicas através da aplicação de forças como compressão, cisalhamento, corte e tensão. A TPA instrumental emprega sucessivas forças deformantes, capazes de simular a ação de compressão de um determinado material e até mesmo a ação do corte dos dentes durante o processo de mastigação (Li et al., 1998). Deste modo, dentre os parâmetros avaliados no TPA encontram-se: dureza, elasticidade, coesividade, adesividade, fraturabilidade, gomosidade, e mastigabilidade, (SZCZESNIAK, 1987; FERREIRA et al, 2000; CHEN e OPARA, 2013).

Devido à sua capacidade de avaliar as características mecânicas e físicas de ingredientes crus e produtos acabados, a TPA é uma técnica que desempenha um papel crucial, principalmente na indústria alimentícia, sendo bem estabelecida nesta (CARNEIRO et al., 2011). É, portanto, comumente usada para controle de qualidade antes e depois de processos como cozimento, bem como para monitorar a qualidade durante o amadurecimento,

pós-colheita e ao longo da vida útil de produtos. Comparada às avaliações sensoriais, essas medições são tipicamente preferidas pois minimizam a variabilidade dos julgamentos subjetivos, além de serem relativamente fáceis de realizar (SATO e YAMADA, 2003).

A avaliação da textura de alimentos é comumente realizada através de máquinas de testes universais (*Universal Test Machines – UTM*), que são compostas pelos seguintes componentes fundamentais: sistema de acionamento, travessa ou braço, célula de teste, sistema de medição e registro de força, motor de passo e *software* computacional, como detalhado na Figura 12.

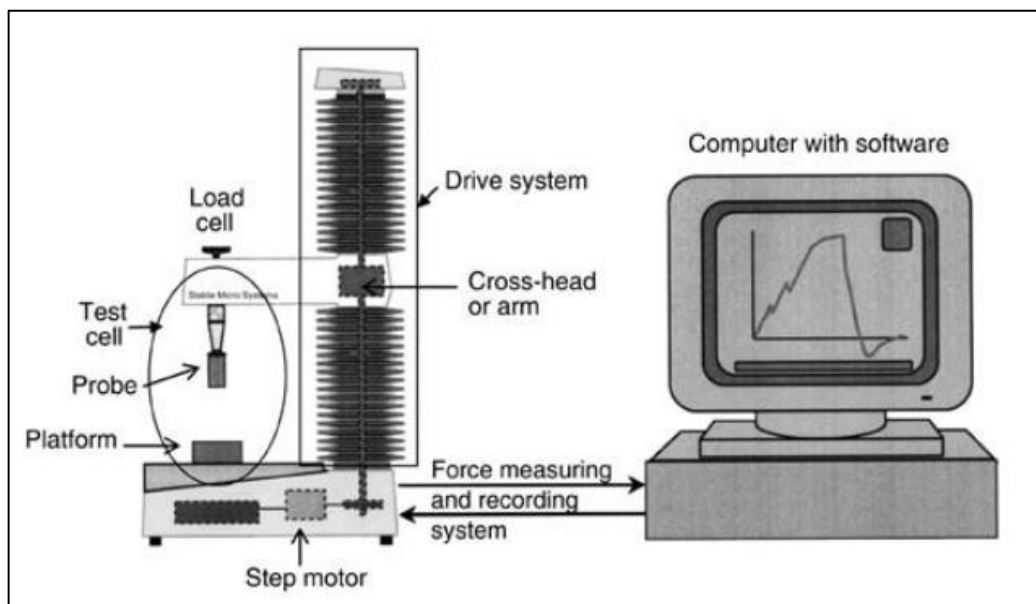


Figura 12. **Desenho esquemático de uma máquina de teste de textura universal.**
Fonte: Letaief (2007).

O funcionamento da UTM começa com o sistema de acionamento (*drive system*), responsável por mover a travessa ou braço (*cross-head* ou *arm*) para que seja aplicada uma força controlada ao material colocado na célula de teste (*test cell*), a qual por sua vez é composta de duas partes: a inferior, que é estacionária e fixada na base da máquina; e a superior, que é móvel e conectada à travessa. Na célula de teste, o material a ser testado é,

portanto, colocado sobre uma plataforma e pressionado por uma sonda (probe).

O motor de passo (*step motor*) garante um movimento preciso para que a força seja aplicada de maneira controlada e uniforme. A célula de carga (*load cell*) mede a força aplicada, e o sistema de medição e registro de força captura esses dados. O computador, equipado com *software* apropriado, exibe e analisa as informações em tempo real, permitindo a visualização das características de deformação do material testado ao longo da força aplicada. Dessa forma, a UTM pode fornecer medidas precisas de força, tempo, distância e deformação, essenciais para a análise de textura e outras propriedades mecânicas de diferentes materiais sólidos e semissólidos.

O analisador de textura pode ser equipado com diversas probes/sondas e acessórios, que são selecionados conforme os requisitos específicos do método. Projetados para grupos específicos de aplicações, esses componentes podem ser fixados tanto à base quanto ao braço do analisador de textura (ROLLE et al., 2012). Por exemplo, lâminas de corte são frequentemente aplicadas para avaliar a maciez e coesão de carnes, enquanto sondas cilíndricas são usadas para medir a firmeza e a resistência à penetração e ruptura de frutas e vegetais (BOURNE, 2002).

A análise de textura instrumental é amplamente utilizada para caracterizar as propriedades mecânicas de alimentos, incluindo sua resistência a choques e deformações (SZCZESNIAK, 2002). A caracterização da textura pode auxiliar o entendimento da resistência de alimentos a diferentes tipos de forças aplicadas, como compressão e impacto, que são relevantes para o processo de descascamento, por exemplo. Sendo deste modo, capaz de fornecer dados valiosos sobre a resistência de castanhas ao estresse mecânico.

MATERIAL E MÉTODOS

Matéria-prima

Foram utilizadas castanhas-do-brasil *in natura* (com casca) oriundas de regiões da floresta Amazônica em áreas de assentamentos do Vale-do-Amanhecer, região Noroeste do Mato Grosso (Figura 13), cedidas pela Cooperativa dos Agricultores do Vale do Amanhecer – COOPAVAM, localizada no município de Juruena/MT. Dois lotes de castanhas (Figura 16), coletados nas terras indígenas de Aripuanã ($10^{\circ}10'01''$ S; $59^{\circ}27'32''$ O) (Figura 14) e Juara ($11^{\circ}15'18''$ S; $57^{\circ}31'12''$ O) (Figura 15), no período de maio de 2023, principais regiões de coleta de castanhas-do-brasil, foram, portanto, avaliados.

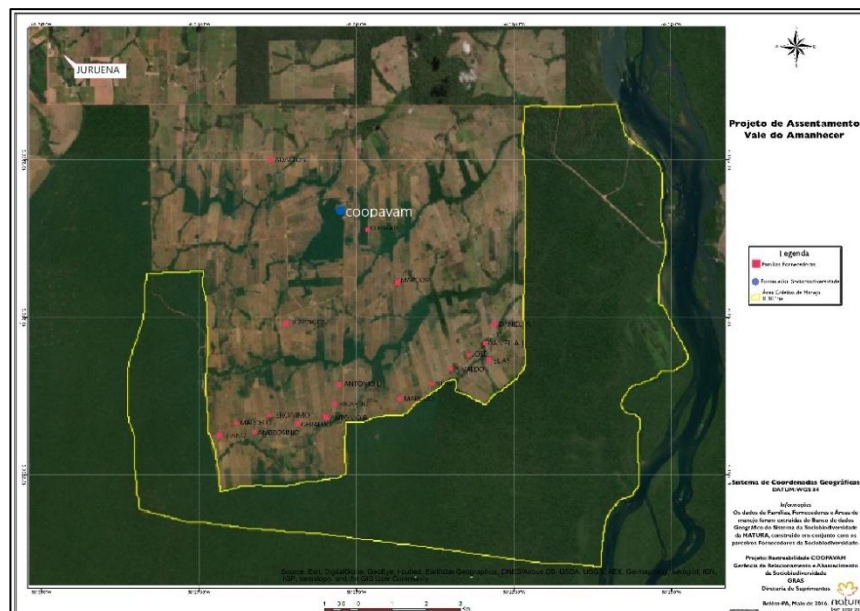


Figura 13. Projeto do Assentamento Vale do amanhecer, Juruena/MT. Cooperativa, fornecedores da castanha-do-brasil e área coletiva de manejo. Fonte: COOPAVAM, 2023.¹

¹ Imagem disponibilizada pela Cooperativa.

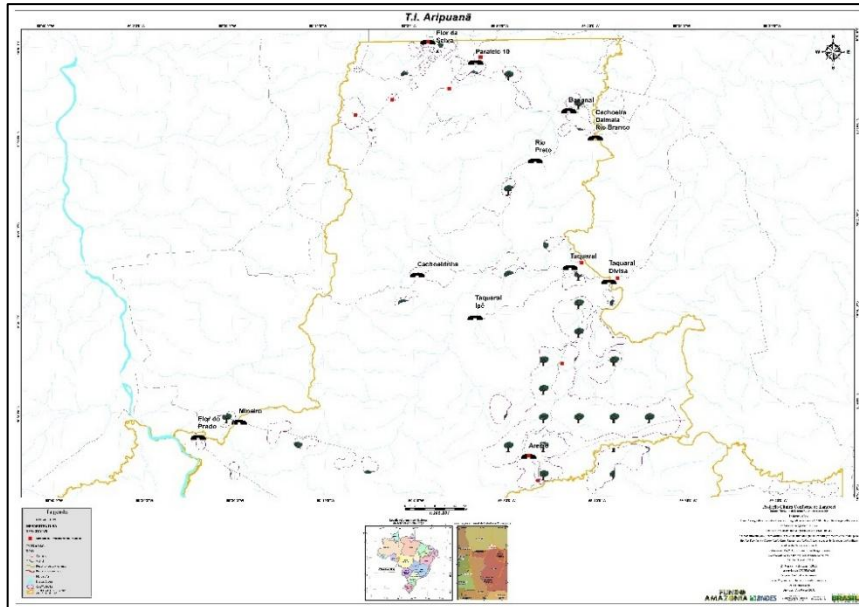


Figura 14. Delimitação geográfica da Terra Indígena Aripuanã (linha amarela), mostrando as regiões de castanhais (linhas roxas). Fonte: COOPAVAM, 2023.²

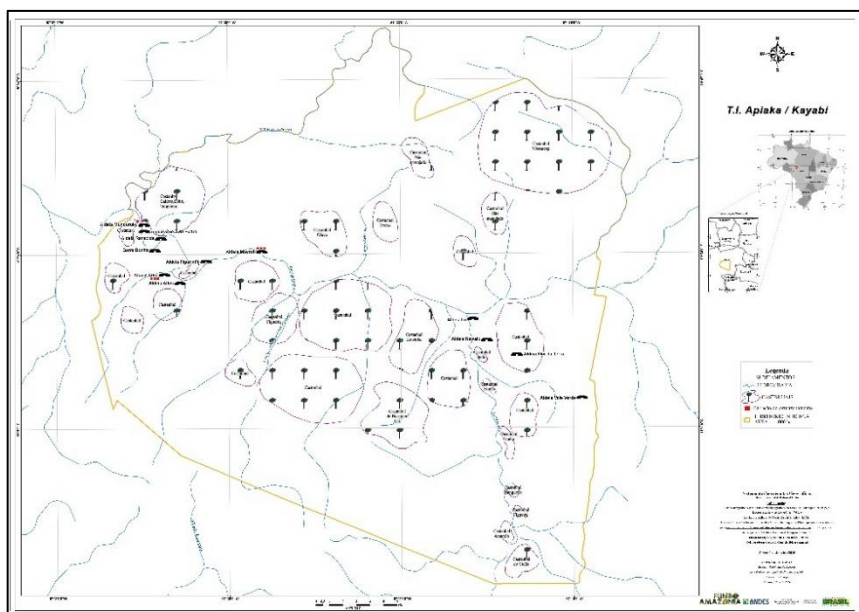


Figura 15. Delimitação geográfica da Terra Indígena Juara (linha amarela), mostrando as regiões de castanhais (linhas roxas). Fonte: COOPAVAM, 2023.²

² Imagem disponibilizada pela Cooperativa.

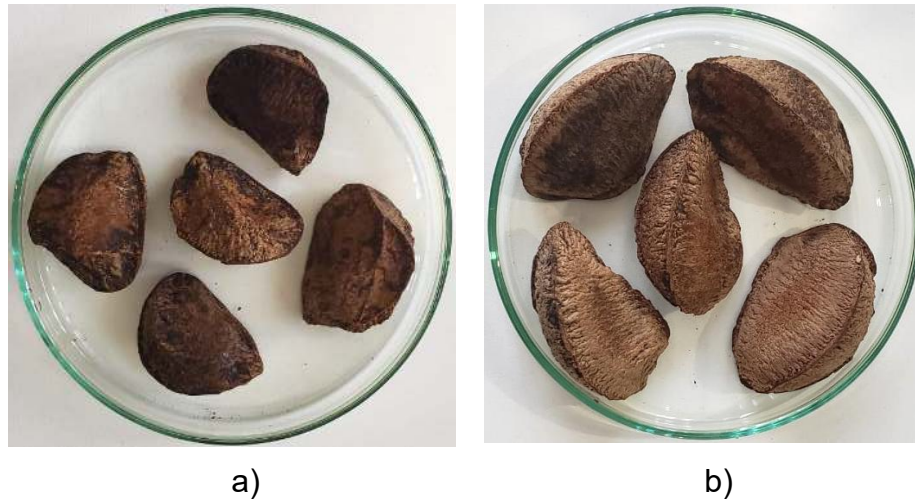


Figura 16: Fotos das castanhas-do-brasil *in natura* cedidas pela COOPAVAM. a) Castanhas coletadas nas Terras Indígenas Juara, b) Castanhas coletadas nas Terras Indígenas Aripuanã.

Caracterização

As castanhas fornecidas pela COOPAVAM foram avaliadas quanto as seguintes características: atividade de água, umidade, composição centesimal, cor, dimensões e massa. Complementarmente, as castanhas oriundas do primeiro processo de secagem em tambor rotativo, recebidas da cooperativa, também foram analisadas quanto ao teor de umidade e atividade de água.

Atividade de água

A atividade de água foi determinada através de leitura direta de amostras homogêneas/trituradas em equipamento AquaLab, modelo 4TE, na temperatura de 25° C (Figura 17).



Figura 17. Equipamento medidor de atividade de água AquaLab 4TE.

Umidade

A determinação de umidade por titulação Karl Fischer (IAL, 2008) (método 014/IV) (Figura 18) é utilizado para a determinação mais precisa do teor de umidade em alimentos. Para isso, foram utilizados um titulador automático Karl Fischer modelo Eco KF Titrator da marca Metrohm®, uma balança analítica (precisão $\pm 0,0001$ g), reagente de Karl Fischer, composto por uma solução de iodo, dióxido de enxofre e uma base (metanol), e solvente metanol:clorofórmio (4:1 em volume). A amostra foi triturada para garantir uniformidade, pesada (20 mg) e transferida para o frasco do titulador. No processo de titulação, o reagente de Karl Fischer é adicionado à amostra, onde reage especificamente com a água presente. A titulação é conduzida até o ponto final, quando toda a água reagiu com o reagente, indicado por uma mudança de cor ou detecção pelo sistema automático do titulador. O volume de reagente consumido é registrado e utilizado para o cálculo do teor de água (Equação 2), sendo fornecido automaticamente pelo aparelho utilizado em porcentagem mássica (g de água/100 g de amostra).

$$\text{Umidade (\%)} = 100 \times \left(\frac{V \times F}{P} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

V = Volume do reagente de Karl Fischer gasto (mL);

F = Fator de titulação de Karl Fischer (mg de água/ mL de reagente)

P = Massa da amostra (g).



Figura 18. Equipamento Karl Fischer utilizado para determinação de umidade.

Dimensões e massas

As análises biométricas (comprimento longitudinal, largura ou diâmetro transversal de amêndoas com e sem casca e espessura da casca) foram realizadas com auxílio de paquímetro digital de precisão de 0,01 mm. (Figuras 19 e 20). As massas das amêndoas com e sem casca foram obtidas por meio de pesagem em balança analítica com precisão de 0,0001 g. Os dados obtidos

das variáveis analisadas foram submetidos à análise descritiva com cálculos de média aritmética desvio padrão e análise estatística.

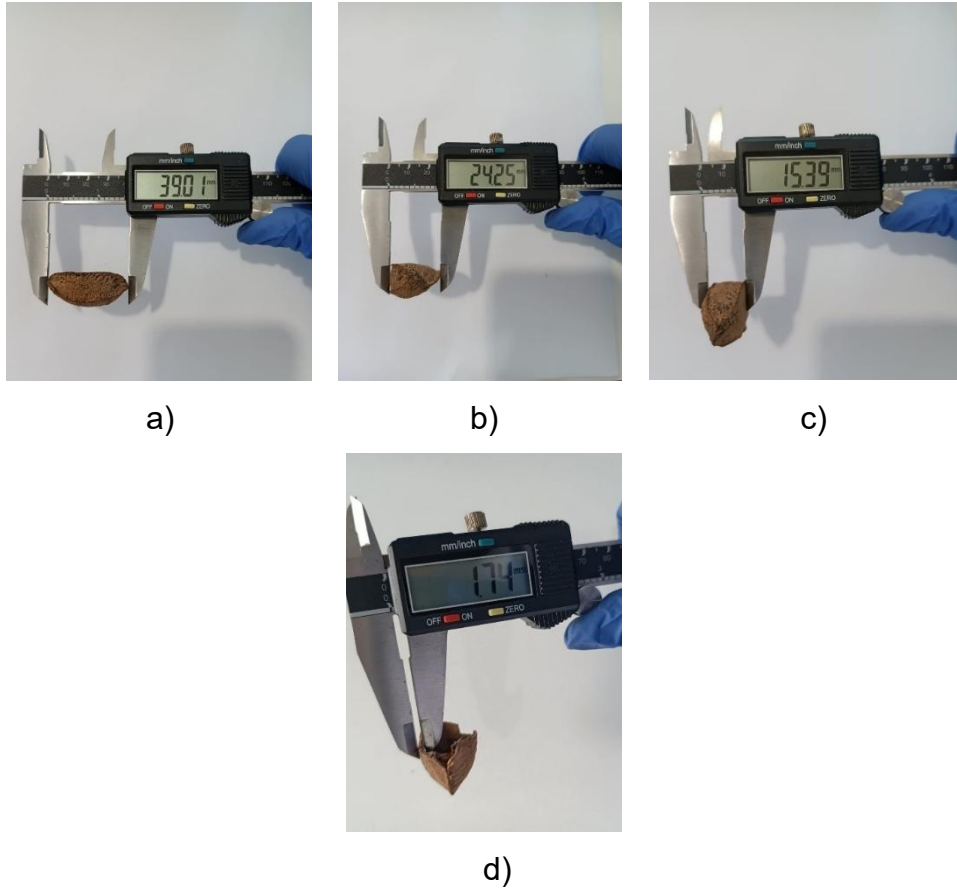


Figura 19. a) Medição do comprimento da castanha, b) Medição da largura da castanha, c) Medição da espessura da castanha, d) Medição da espessura da casca.

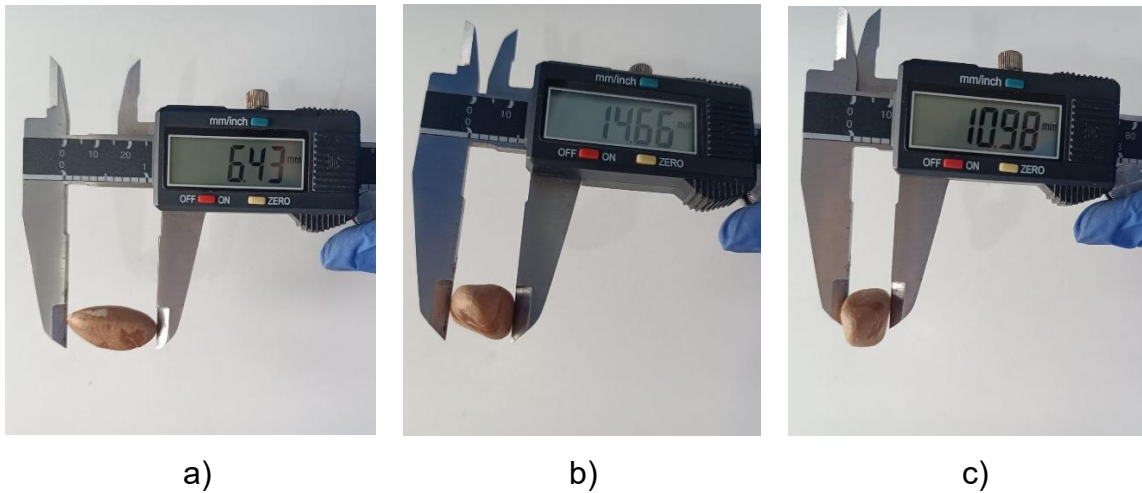


Figura 20. **a) Medição do comprimento da amêndoa, b) Medição da largura da amêndoa, c) Medição da espessura da amêndoa.**

Cor

A cor das castanhas (casca, amêndoa e película) *in natura* e que foram submetidas às isotermas de dessorção e adsorção foi avaliada instrumentalmente através da medição em 3 zonas distintas utilizando colorímetro Konica Minolta (CR400) (Figura 21) no modo CIE-L*a*b*, presente no Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal (LMGV/CCTA/UENF). A coordenada L* se refere ao nível de luminosidade, representando quão clara ou escura é a amostra, com valores variando de 0 (totalmente preta) a 100 (totalmente branca). Já a coordenada a* pode assumir valores de -80 a +100, em que os extremos correspondem ao verde e ao vermelho, respectivamente. Por fim, a coordenada b*, com a intensidade de azul ao amarelo, pode variar de -50 (totalmente azul) a +70 (totalmente amarelo). A saturação e intensidade da cor foram avaliadas através do cálculo do Cromo (Equação 3) e do ângulo Hue (Equação 4) (MCGUIRE, 1992).

$$Cr = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$^{\circ}\text{Hue} = \arctg \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

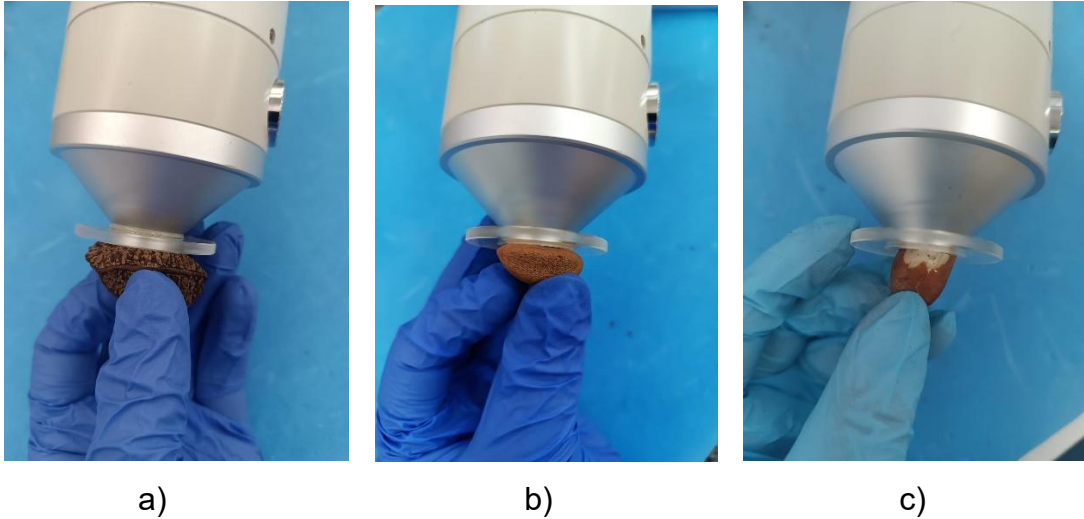


Figura 21. a) Leitura de cor na casca, b) Leitura de cor na película, c) Leitura de cor na amêndoa.

Composição

Castanhas *in natura* Juara e Aripuanã inteiras e em frações (casca e amêndoa) foram caracterizadas em termos de teor de umidade e macronutrientes: lipídios, proteínas, carboidratos e cinzas, conforme os métodos descritos a seguir. Todas as análises foram realizadas nos setores do Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA/CCTA/UENF), ao menos em triplicata.

O óleo extraído de amêndoas *in natura* Juara e Aripuanã foi caracterizado quanto a composição de ácidos graxos e acidez no laboratório de Extração, Termodinâmica Aplicada e Equilíbrio (ExTrAE) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Lipídios

A determinação de lipídios pelo método Soxhlet (IAL, 2008) com extração direta (método 032/IV) foi realizada utilizando 300 mL de solvente hexano (ao invés de éter) em balão volumétrico previamente pesado em balança analítica com precisão de 0,0001 g. Sendo assim, 5 g da amostra (também pesada em balança analítica) homogeneizada e previamente seca em estufa a 105 °C, colocada em um cartucho de extração e inserida no aparato Soxhlet, sendo submetida a um ciclo contínuo de extração por um período de ao menos 6 horas (Figura 22). Finalizada a extração, o balão contendo extrato (solvente + óleo) foi levado a aparelho rotaevaporador para destilação, sendo posteriormente pesado novamente para determinar a massa dos lipídios extraídos. O teor de lipídios (g de lipídios/ 100 g) foi calculado tanto a partir da massa de lipídios extraídos (Equação 5), quanto pela diferença de massa da amostra sólida antes e após o processo de extração.

$$\text{Lipídios (\%)} = 100 \times \left(\frac{L}{M} \right) \quad (\text{Eq .5})$$

Em que:

L = Massa de lipídios totais (g): determinado pela pesagem do balão volumétrico após dessolventização ou por diferença de massa do sólido antes e após extração;

M = Massa de amostra seca (g).



Figura 22. **Aparelho Soxhlet para determinação de lipídios.**

Proteínas

O teor de proteína bruta foi determinado pelo método de Kjeldahl (IAL, 2008) modificado (método 037/IV) (Figura 23), o qual envolve três etapas principais: digestão, destilação e titulação. Para a digestão, processo em que o nitrogênio presente é transformado em amônia (NH_3), 0,5 g de amostra, 5 mL de ácido sulfúrico e 1 g de mistura catalítica foram pesados em balança analítica de precisão 0,0001 g e colocados em tubos de ensaio. Em seguida, os tubos foram levados a bloco digestor sob aquecimento até que fosse observada completa digestão da amostra, indicada por uma solução de coloração verde translúcida ou incolor.

Após o processo de digestão, as amostras foram mantidas em repouso para resfriamento e transferidas para o balão do sistema de destilação, onde foram adicionados 50 mL de água destilada e 20 ml de NaOH a 40% (m/v) para assegurar excesso de base. O balão foi acoplado ao condensador e

mantido sob aquecimento. O sistema destilou a amônia liberada, que foi coletada em uma solução de ácido bórico 0,033 M com indicador vermelho de metila. O sistema foi aquecido a ebulição, até que fosse obtido aproximadamente 50 mL de destilado, o qual foi titulado com solução HCl 0,1 M usando indicador vermelho de metila. A quantidade total de nitrogênio presente na amostra foi determinada através da Equação 6. Para a conversão do nitrogênio total contido na amostra em proteína bruta foi utilizado o fator de 5,46 para castanha-do-brasil, conforme IAL (2008).

$$\text{Proteínas totais (\%)} = \left(\frac{V \times 0,14 \times F}{M} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que:

V = Volume do HCl gasto (mL);

M = Massa da amostra seca (g);

F = Fator de conversão.



a)



b)



c)

Figura 23. Método de Kjeldahl. a) Etapa de digestão, b) Etapa de destilação, c) Etapa de titulação.

Cinzas

A determinação de cinzas foi realizada por incineração em mufla (IAL, 2008) (método 018/IV). Este método envolve a completa queima da matéria orgânica de uma amostra alimentar, deixando apenas o material inorgânico (minerais) (Figura 24). O processo inicia-se com a limpeza e secagem dos cadinhos de porcelana, que foram pesados em balança analítica com precisão de $\pm 0,0001$ g para obter a massa inicial. Os cadinhos com 2 g de amostra trituradas e pesadas com precisão foram colocados em mufla, aquecida a 550 °C, por um período de 5 h. Este tempo permite que toda a matéria orgânica seja incinerada, resultando em um material de coloração branca ou cinza claro. Após a incineração, os cadinhos foram resfriados em um dessecador até a temperatura ambiente e pesados novamente para determinação da massa final. O teor de cinzas foi calculado pela diferença entre a massa final dos cadinhos (com cinzas) e a massa inicial dos cadinhos vazios, expressa como porcentagem mássica (g de cinzas/ 100 g de amostra seca) (Equação 7).

$$\text{Cinzas (\%)} = 100 \times \left(\frac{C}{M} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que:

C = Massa de cinzas (g);

M = Massa da amostra seca (g).

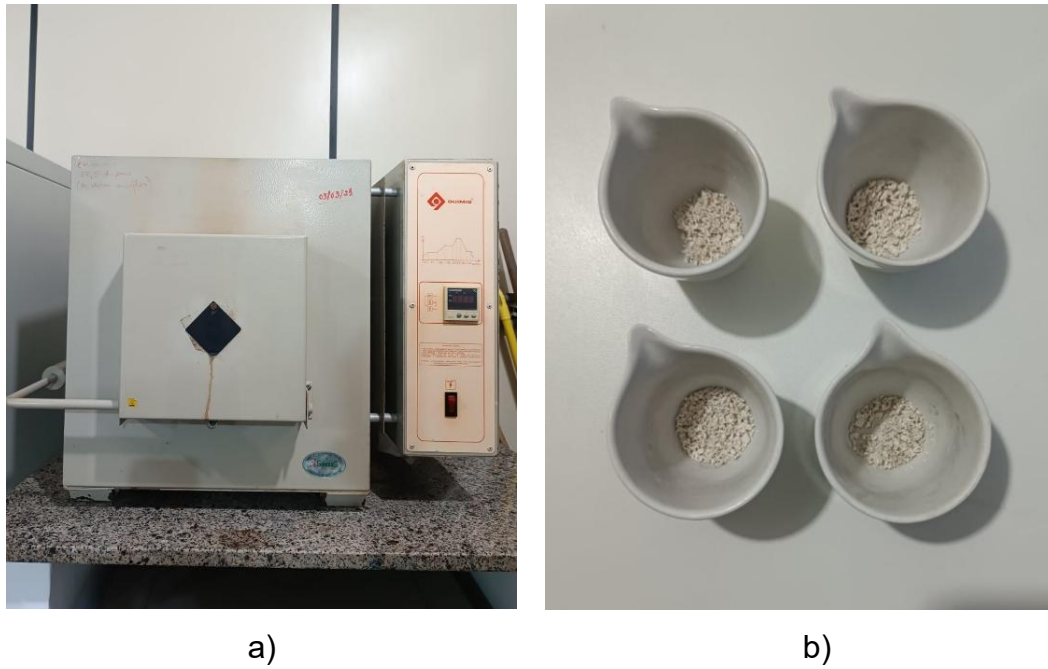


Figura 24. a) Mufla utilizada para determinação de cinzas, b) Amostra após queima em mufla.

Carboidratos

Os carboidratos incluem açúcares simples e complexos, e fibras. O teor de carboidratos totais foi determinado por diferença, com base na Resolução RDC n° 360, de 23 de dezembro de 2003 (BRASIL, 2003), conforme equação 8:

$$\% \text{ carboidratos} = 100 - \sum(P + L + X + C) \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

P = Proteínas (g/ 100 g);

L = Lipídios (g/ 100 g);

X= Teor de umidade (g/ 100 g);

C = Cinzas (g/ 100 g).

Valor energético total

O valor energético total ou valor calórico (Kcal/100 g) foi determinado utilizando os fatores de conversão de Atwater: 4 kcal/g para proteínas, 4 kcal/g para carboidratos e 9 kcal/g para lipídios. O cálculo foi realizado conforme a Resolução RDC nº 360, de 23 de dezembro de 2003 (BRASIL, 2003), conforme a equação 9 a seguir:

$$\text{Valor energético total} = (P \times 4) + (Ct \times 4) + (L \times 9) \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

P = Proteínas (g/ 100 g);

Ct = Carboidratos totais (g/ 100 g);

L = Lipídios (g/ 100 g)

Perfil de ácidos graxos

O perfil de ácidos graxos foi determinado por cromatografia gasosa de acordo com o método Ce 1–62 (AOCS, 2009). As análises foram realizadas em um cromatógrafo a gás (modelo 7890B, Agilent, EUA) equipado com detector de ionização de chama (FID) e coluna capilar (modelo Agilent DBWAX) com dimensões de 0,25 mm de diâmetro interno, 30 m de comprimento e espessura de filme de 0,25 µm. Antes da análise cromatográfica, as amostras foram transesterificadas em ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME), de acordo com Hartman e Lago (1973). A temperatura da coluna foi programada de 50 a 250 °C, com taxa de aumento de 15 °C/min até atingir 120 °C e 15 min de espera e continuando até atingir 250 °C, a uma taxa 4 °C/min. As temperaturas do injetor e do detector foram de 250 e 300 °C, respectivamente. A identificação dos picos cromatográficos foi realizada comparando os tempos de retenção da amostra com o cromatograma dos

padrões de ésteres metílicos de ácidos graxos (Sigma-Aldrich, EUA). A quantificação foi feita por normalização interna, considerando as áreas dos picos principais.

Acidez livre

O conteúdo de ácidos graxos livres foi determinado em titulador automático (848 Titrino plus, Metrohm, Suíça) utilizando solução padronizada 0,1 N de NaOH e solução de álcool isopropílico como solvente. Cerca de 5 g de óleo foram diluídos em 40 mL de isopropanol. O conteúdo de solução titulante necessária para neutralizar as amostras foi convertida em porcentagem de ácidos graxos livres (g ácidos graxos livres/100 g de óleo) pela equação 10:

$$\text{Acidez livre (\%)} = 100 \times \frac{V_{\text{NaOH}} \times N \times \overline{MM}}{m} \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que:

V_{NaOH} = Volume gasto da solução titulante (L);

N= Normalidade padronizada da solução (mol/L);

\overline{MM} = Massa molar média ponderada dos ácidos graxos presentes no óleo de castanha-do-brasil (278 g/mol);

M= Massa da amostra (g)

Ensaio de isotermas de sorção

As umidades de equilíbrio nos ensaios de dessorção e adsorção das castanhas Juara e Aripuanã foram estabelecidas pelo emprego do método estático gravimétrico. Para isso, as amostras (castanhas-do-brasil com casca)

foram condicionadas em dessecadores com fechamento hermético contendo soluções salinas saturadas em estufa de circulação de ar (Figura 25). Para sistemas com valores elevados de a_w , foram adicionadas algumas gotas de formol (solução 37% metanol em massa) para evitar proliferação microbiana.

As soluções salinas que produzem diferentes ambientes de umidade relativa em temperaturas experimentais são apresentadas na Tabela 3, com suas respectivas umidades relativas conforme as especificações de Greenspan (1977). A temperatura dos sistemas foi controlada por estufa. Foram avaliadas as temperaturas de 25°C nos ensaios de adsorção e 60 °C nos ensaios de dessorção, simulando a temperaturas ambiental e a média empregada nos processos de secagem da castanha-do-brasil. Para cada condição ou ponto da isoterma, foram preparados 4 (quatro) frascos/dessecadores contendo ao menos 6 castanhas, sendo um controle.

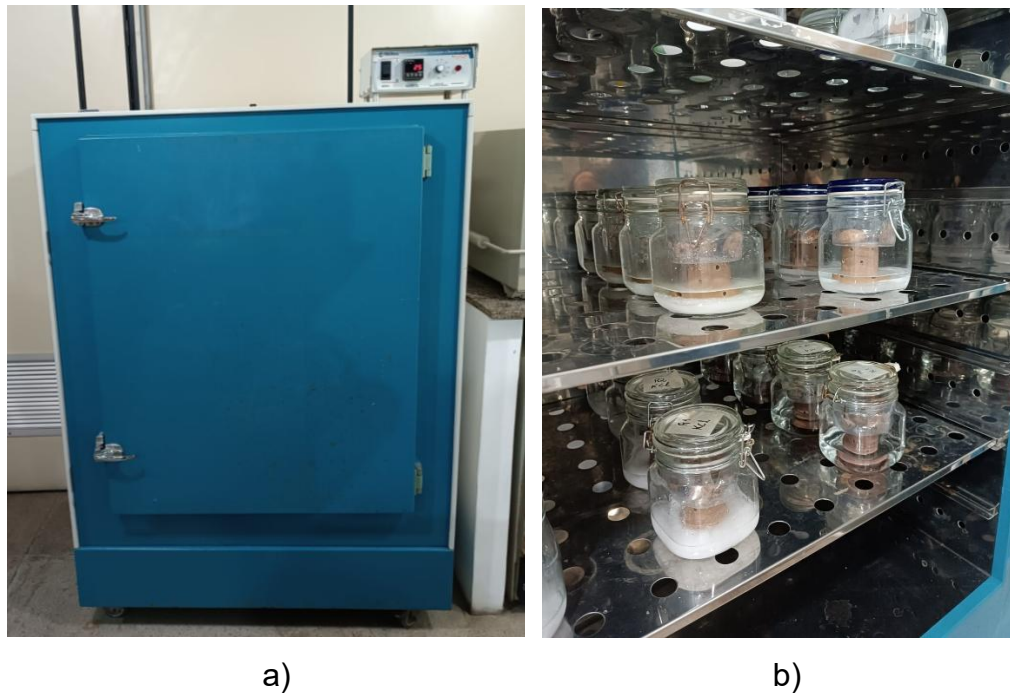


Figura 25: a) Estufa utilizada para controle da temperatura das isotermas, b) frascos dentro da estufa contendo soluções salinas saturadas e castanhas.

Tabela 3. Umidades relativas exibidas por diferentes soluções salinas saturadas para as condições de temperatura de 25 e 60°C.*

Sal	Umidade relativa de equilíbrio (%)	
	25 °C	60 °C
Hidróxido de sódio (NaOH)**	8,24 ± 2,10	3,61 ± 0,65
Cloreto de magnésio (MgCl ₂)**	32,78 ± 0,16	29,26 ± 0,18
Brometo de sódio (NaBr)	57,57 ± 0,40	49,66 ± 0,78
Cloreto de cobalto (CoCl ₂)	64,92 ± 3,50	46,74 ± 1,50
Nitrato de sódio (NaNO ₃)	74,25 ± 0,32	67,35 ± 0,57
Cloreto de sódio (NaCl)	75,29 ± 0,12	74,50 ± 0,30
Cloreto de potássio (KCl)	84,34 ± 0,26	80,25 ± 0,41

* Valores reportados por Greenpan (1977);

** Sais que não foram utilizados nas isotermas de adsorção.

As amostras do frasco controle foram pesadas diariamente em balança analítica (precisão $\pm 0,0001$ g) até que não fosse mais observada mudanças expressivas em sua massa, indicando que o equilíbrio higroscópico foi atingido para uma determinada condição de temperatura e UR. Durante este período, as amostras foram inspecionadas visualmente a fim de detectar qualquer degradação ou alterações aparentes.

Após o estabelecimento do equilíbrio, 2 (duas) castanhas de cada frasco foram homogeneizadas (trituras) e utilizadas para a determinação de atividade de água e teor de umidade, enquanto as demais foram submetidas a ensaios de força de ruptura da casca em Máquina de Ensaios Universal (item 6.4) e análise de cor da casca amêndoa e película (item 4.2.4)

Para os ensaios de dessecção a 60 °C (remoção de umidade contida no material), foram utilizadas castanhas *in natura*. Este material recebido pela unidade de beneficiamento trata-se do coletado nas terras indígenas, passando por seleção e pré-secagem na floresta, assim como mostrado no fluxograma da figura 5 anteriormente.

Para os ensaios de adsorção a 25 °C, onde o material recebe umidade do ambiente ou durante um processo, as castanhas foram previamente secas até atingirem a umidade. Nestes ensaios foi avaliada a incorporação de umidade ao produto seco, com intuito de simular diferentes situações nas

quais a castanha poderá ser submetida, como seu armazenamento, ou contato com vapor de água na autoclave.

Secagem das castanhas para isothermas de adsorção

As castanhas dos lotes Juara e Aripuanã, em estado *in natura*, foram submetidas à secagem em secador com fluxo de ar quente, operando a 60 °C (Figura 26), até atingirem a umidade de equilíbrio. Para isso, foram utilizadas 400 g de amostras dispostas em bandejas acopladas a uma balança de precisão, permitindo o monitoramento contínuo da variação de massa ao longo do tempo. As pesagens foram realizadas em intervalos regulares previamente definidos (a cada 15 min durante as duas primeiras horas, a cada 30 min nas duas horas seguintes, e a cada 45 min em diante). Quando a massa da amostra permaneceu constante, a secagem foi considerada finalizada. Ao final de cada secagem, determinou-se o teor de umidade e atividade de água do material.

Com os dados obtidos, foram construídas curvas de razão de umidade (RU) em função do tempo. A RU foi calculada conforme Equação 11:

$$RU = \frac{X - X_E}{X_0 - X_E} \quad (\text{Eq. 11})$$

Em que:

X = Umidade no tempo t;

X_e = Umidade de equilíbrio;

X₀ = Umidade inicial em base seca.

Também foram construídas curvas de taxa de secagem em função do tempo. A taxa de secagem foi calculada conforme equação 12:

$$\text{Taxa de secagem} = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X_{n+1} - X_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que:

$X_{n+1} - X_n$ = diferença entre duas leituras de umidade subsequentes, em gramas de água por gramas de massa seca (g H₂O/g massa seca);

$t_{n+1} - t_n$ = diferença entre duas leituras de tempos subsequentes.



Figura 26. a) Sistema de secagem em fluxo de ar quente; b) Bandeja com castanhas acoplada a balança de precisão.

Contração volumétrica

A contração volumétrica das castanhas-do-brasil foi determinada para os dois lotes (Juara e Aripuanã), submetidos à secagem em secador de fluxo de ar quente a 60 °C. Para cada lote, foram realizadas três repetições independentes de secagem, sendo cada repetição composta por uma bandeja contendo 400 g de castanhas *in natura*, distribuídas em camada única.

Antes e após a secagem, cada castanha da bandeja foi medida individualmente quanto ao comprimento (C), largura (L) e espessura (E),

utilizando paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. O volume individual foi estimado considerando o formato de elipsoide escaleno, segundo a equação 13:

$$V = \frac{\pi}{6} \times C \times L \times E \quad (\text{Eq. 13})$$

Em que:

V = volume (cm³);

C= comprimento (mm);

L= largura (mm);

E= espessura da castanha (mm).

Para conversão para cm³, o valor foi dividido por 1000.

A contração volumétrica percentual (CV %) de cada castanha foi calculada com, utilizando-se a equação 14:

$$CV (\%) = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 14})$$

Em que:

V_i = Volume inicial das castanhas *in natura* (cm³),

V_f = Volume final das castanhas secas (cm³).

Para cada repetição, foram calculadas as médias do volume inicial, volume final e da contração volumétrica de todas as castanhas presentes na bandeja. Essas médias representaram o valor de cada repetição e foram utilizadas para a análise estatística entre os lotes.

Modelagem matemática

Os dados experimentais de dessorção e adsorção foram utilizados para o ajuste dos parâmetros de modelos matemáticos semiempíricos comumente utilizados para representação da higroscopicidade em alimentos: BET, GAB, BET Modificado e GAB Modificado (Tabela 4). A adoção de modelos semiempíricos se justifica por sua dupla funcionalidade: além de oferecerem bom desempenho estatístico no ajuste dos dados experimentais, esses modelos também permitem interpretações físico-químicas relevantes sobre os mecanismos de adsorção, com destaque para a estimativa da umidade da monocamada (X_m) (Equações 15 a 18).

A determinação do valor de X_m é particularmente importante no contexto da estabilidade dos alimentos, uma vez que produtos armazenados com umidade próxima a da monocamada tendem a apresentar maior resistência à deterioração (Silva, 2015).

Tabela 4. Modelos matemáticos utilizados para ajustes dos dados experimentais das isotermas.

Modelo	Equação
BET	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot aw}{(1-aw) \cdot [1+(C-1) \cdot aw]} \quad (\text{Eq. 15})$
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot aw}{[(1-K \cdot aw) \cdot (1-K \cdot aw + C \cdot K \cdot aw)]} \quad (\text{Eq. 16})$
BET Modificado	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot aw}{(1-K \cdot aw) \cdot (1 + aw \cdot (C-K))} \quad (\text{Eq. 17})$
GAB Modificado	$X_{eq} = \frac{X_m \cdot \frac{C}{T} \cdot K \cdot aw}{[(1-K \cdot aw) \cdot (1-K \cdot aw + \frac{C}{T} \cdot K \cdot aw)]} \quad (\text{Eq. 18})$

Para avaliar a adequação às curvas de secagem das castanhas Juara e Aripuanã, foram utilizados três modelos matemáticos (Tabela 5) (Equações 19 a 21).

Tabela 5. Modelos matemáticos utilizados para ajustes dos dados experimentais de secagem das castanhas Juara e Aripuanã.

Modelo	Equação	
Newton	$RU = e^{-kt}$	(Eq. 19)
Page	$RU = e^{-kt^n}$	(Eq. 20)
Henderson & Pabis	$RU = a \times e^{-kt}$	(Eq. 21)

Avaliação da força de ruptura da casca

A resistência física das castanhas foi avaliada por meio de ensaios de compressão uniaxial, realizados em máquina de ensaios universal Instron® 34FM-100, presente no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV/ UENF) (Figura 27). As castanhas foram submetidas à aplicação de carga compressiva vertical entre duas probe/sonda cilíndrica metálicas (Figura 28), com velocidade constante de 0,5 mm/min. O ensaio foi conduzido até o momento de ruptura da casca, ponto em que era interrompido no sistema a aplicação de carga. A força máxima aplicada até a ruptura (N) foi registrada diretamente pelo software de aquisição acoplado ao equipamento, sendo utilizada como parâmetro de comparação entre os tratamentos.



Figura 27. Máquina de ensaios universal Instron® 34FM-100.



Figura 28. Castanha em ensaio de compressão para determinação de força de ruptura da casca.

O estudo da relação entre umidade e a força de ruptura da casca visou caracterizar o comportamento físico de diferentes lotes de castanhas a fim de estabelecer parâmetros de processo que auxiliem a COOPAVAM em melhores práticas de secagem e descascamento.

Análise estatística

As variáveis físico-químicas e colorimétricas foram submetidas à análise de variância (ANOVA) para detecção de diferenças significativas entre os tratamentos. Nos casos em que a ANOVA indicou significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Adicionalmente, quando pertinente, as comparações entre dois grupos foram realizadas por meio do teste t, também considerando nível de significância de 5%.

Para avaliação do ajuste dos modelos matemáticos aplicados aos dados experimentais, foram considerados os coeficientes de significância pelo teste t ($>0,01$), coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), e teste de Qui-quadrado (X^2). Os valores de SE, P e X^2 foram calculados através das Equações 22, 23 e 24, respectivamente.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y-\hat{Y})^2}{GRL}} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y-\hat{Y}|}{Y} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$X^2 = \sum \frac{(Y-\hat{Y})^2}{GRL} \quad (\text{Eq. 24})$$

Em que:

Y = valor experimental;

\hat{Y} = valor estimado;

n = número de observações;

GLR = graus de liberdade do resíduo (diferença entre o número de dados observados e o número de parâmetros do modelo).

A qualidade do ajuste dos modelos matemáticos às curvas experimentais de secagem das castanhas em secador com fluxo de ar quente para isothermas de adsorção foi avaliada por regressão não linear, com base nos maiores coeficientes de determinação (R^2) e nos menores valores de qui-quadrado (X^2).

Aplicou-se também aos dados, Análise de Componentes Principais (PCA). Para o enquadramento do modelo estatístico em questão, foram incluídas 17 variáveis, sendo estas: Umidade (X), força de ruptura da casca (F) e os parâmetros de cor L^* , a^* , b^* , Cr^* e Hue° para casca ©, amêndoa (a) e película (p). As amostras trataram-se, portanto, dos diferentes níveis de atividade de água (aw) estabelecidos nas isotherma de dessorção e adsorção das castanhas Juara e Aripuanã, usados como rótulos das observações. Os dados da PCA foram processados estatisticamente pelo software Origin Pro ®, assim como os ajustes matemáticos aplicados aos dados experimentais das isothermas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atividade de água e umidade

A caracterização da atividade de água (a_w) e do teor de umidade (%b.u.) das castanhas-do-brasil dos lotes Juara e Aripuanã revelou diferenças estatisticamente significativas entre os materiais, tanto no estado *in natura* quanto após a secagem (Tabelas 6 e 7).

Tabela 6. Atividade de água (a_w) das castanhas e frações (casca e amêndoa) dos lotes Juara e Aripuanã *in natura* e secas.

Frações	Atividade de água (a_w)	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Castanha <i>in natura</i>	0,9692 ± 0,007 ^a	0,887 ± 0,005 ^b
Castanha seca	0,646 ± 0,007 ^a	0,649 ± 0,003 ^a
Casca <i>in natura</i>	0,921 ± 0,005 ^{aB}	0,84 ± 0,01 ^{bB}
Casca seca	0,695 ± 0,004 ^{aA}	0,638 ± 0,002 ^{bA}
Amêndoa <i>in natura</i>	0,958 ± 0,002 ^{aA}	0,876 ± 0,004 ^{bA}
Amêndoa seca	0,608 ± 0,002 ^{aB}	0,599 ± 0,003 ^{bB}

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$), comparando os lotes Juara e Aripuanã para cada fração. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na mesma coluna não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$), comparando as frações (casca e amêndoa) dentro de cada lote.

Tabela 7. Umidade (%b.u. ou g água/100 g) das castanhas e frações (casca e amêndoa) dos lotes Juara e Aripuanã *in natura* e secas.

Frações	Umidade (g água/100 g)	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Castanha <i>in natura</i>	18,5 ± 0,6 ^a	14,3 ± 0,3 ^b
Castanha seca	8,1 ± 0,6 ^a	6,9 ± 0,7 ^b
Casca <i>in natura</i>	25 ± 1 ^{aA}	22,8 ± 0,6 ^{aA}
Casca seca	15,2 ± 0,5 ^{aA}	13,1 ± 0,1 ^{bA}
Amêndoa <i>in natura</i>	12,1 ± 0,3 ^{aB}	9,6 ± 0,2 ^{bB}
Amêndoa seca	5,1 ± 0,1 ^{aB}	4,6 ± 0,2 ^{bB}

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$), comparando os lotes Juara e Aripuanã para cada fração. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na mesma coluna não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$), comparando as frações (casca e amêndoa) dentro de cada lote.

Na condição *in natura*, as castanhas inteiras Juara apresentaram valores significativamente mais elevados de a_w (0,9692) e umidade (18,5%b.u.) em relação às castanhas Aripuanã ($a_w = 0,8869$; umidade = 14,3%), com diferenças estatisticamente comprovadas (a_w : $p < 0,05$; $t = 19,38 > t$ crítico = 2,57; umidade: $p < 0,05$; $t = 12,73 > t$ crítico = 2,57). Esses resultados indicam que, em sua forma natural, as castanhas Juara retêm maior quantidade de água e apresentam maior proporção de água livre, mais facilmente mobilizável no sistema.

As frações de casca e amêndoa das castanhas *in natura* apresentaram diferenças significativas nos parâmetros de umidade e atividade de água entre os lotes Juara e Aripuanã. As amêndoas Juara exibiram valores superiores de atividade de água ($a_w = 0,9575$) e umidade (12,13%b.u.) em comparação a Aripuanã ($a_w = 0,8764$; umidade = 9,63%b.u.), com diferenças estatisticamente significativas (a_w : $p < 0,05$; $t = 31,51 > t$ crítico = 2,57; umidade: $p < 0,05$; $t = 15,05 > t$ crítico = 2,57). De forma semelhante, a casca do lote Juara apresentou maior atividade de água (0,9214 contra 0,8429; $p < 0,05$; $t = 11,96 > t$ crítico = 2,78) e maior umidade (24,60% contra 22,85%b.u.; $p < 0,05$; $t = 2,97 > t$ crítico = 2,57) em relação ao lote Aripuanã. Esses resultados indicam que, nas duas frações analisadas, o material do lote Juara retém mais água e possui maior proporção de água livre, o que pode

influenciar seu comportamento higroscópico, estabilidade físico-química e resposta ao processamento.

Ambos os lotes de castanhas secas pela cooperativa apresentaram reduções acentuadas de atividade de água e umidade. A castanha inteira Juara seca apresentou $a_w = 0,646$ e umidade de 8,1%b.u., enquanto a Aripuanã apresentou $a_w = 0,6488$ e 6,9%b.u., respectivamente. A comparação entre os lotes secos mostrou que não houve diferença significativa para os valores de a_w ($p = 0,483$; $t = -0,77 < t \text{ crítico} = 2,78$), mas a umidade foi significativamente maior em Juara ($p = 0,035$; $t = 2,71 > t \text{ crítico} = 2,45$).

As amêndoas secas Juara apresentaram atividade de água significativamente maior (0,6079) que as de Aripuanã (0,5987; $p < 0,05$; $t = 4,87 > t \text{ crítico} = 2,45$), assim como maior umidade média (5,07 %b.u. contra 4,61%b.u.; $p < 0,05$; $t = 4,35 > t \text{ crítico} = 2,57$). De forma semelhante, a casca seca de Juara também apresentou atividade de água superior ($a_w = 0,6953$) em comparação à de Aripuanã ($a_w = 0,6382$; $p < 0,05$; $t = 23,05 > t \text{ crítico} = 2,57$), bem como umidade (15,22%b.u. contra 13,08%b.u.; $p < 0,05$; $t = 8,32 > t \text{ crítico} = 3,18$).

Dentro de um mesmo lote, na condição *in natura*, as amêndoas apresentaram a_w significativamente maior que as cascas: amêndoa Juara, $a_w = 0,9575$ contra casca Juara $a_w = 0,9214$ ($p < 0,0001$; $t = -22,31 > t \text{ crítico} = 3,18$); amêndoa Aripuanã, $a_w = 0,8764$ contra casca Aripuanã $a_w = 0,8429$ ($p = 0,0214$; $t = -4,42 > t \text{ crítico} = 3,18$). Essa diferença sugere, que nesta condição, a água presente na amêndoa está predominantemente em forma livre ou fracamente adsorvida, tornando-se mais suscetível à participação em reações físico-químicas e microbiológicas.

Por outro lado, a casca *in natura* apresentou teores de umidade significativamente superiores aos da amêndoa em ambas as amostras (Juara: 24,6%b.u. vs. 12,1%b.u., $p < 0,0001$; $t = 29,20 > t \text{ crítico} = 3,18$; Aripuanã: 22,8%b.u. vs. 9,6%, $p < 0,0001$; $t = 37,64 > t \text{ crítico} = 3,18$), evidenciando maior retenção de água total.

Após a secagem, essas diferenças no teor de umidade entre as frações se mantiveram, porém a casca apresentou maior a_w do que a amêndoa em ambos os lotes. Nas castanhas Juara, a casca seca apresentou $a_w = 0,6953$,

significativamente maior que a da amêndoa ($a_w = 0,6079$; $p < 0,05$; $t = 72,64 > t_{\text{crítico}} = 3,18$), e umidade de 15,2%b.u., também superior à da amêndoa (5,1%b.u.; $p < 0,0001$; $t = 43,83 > t_{\text{crítico}} = 3,18$). Resultados semelhantes foram observados no lote Aripuanã, com $a_w = 0,6382$ na casca e $a_w = 0,5987$ na amêndoa ($p < 0,05$; $t = 32,17 > t_{\text{crítico}} = 3,18$), e umidade de 13,1%b.u. na casca contra 4,6%b.u. na amêndoa ($p < 0,05$; $t = 243,80 > t_{\text{crítico}} = 3,18$). Esse comportamento da casca pode estar associado à sua atuação como uma barreira higroscópica natural, capaz de modular a interação da amêndoa com o ambiente externo, absorvendo e retendo água do meio, ao mesmo tempo em que protege a amêndoa, limitando a entrada direta de umidade. Dessa forma, a casca contribui para a proteção física e higroscópica do conteúdo interno da castanha.

Beuchat (1978), ao analisar diferentes nozes *in natura*, identificou uma relação inversa entre o teor de óleo e a umidade: quanto maior o conteúdo lipídico da amêndoa, menor a sua capacidade de retenção de água sob as mesmas condições de a_w . Isso ocorre porque os lipídios, sendo apolares, possuem baixa afinidade pelas moléculas de água, o que resulta em menor capacidade de adsorção hídrica. No presente estudo, a amêndoa da castanha-do-brasil, exibiu comportamento compatível com esse princípio, apresentando menores teores de umidade mesmo em condições de a_w elevadas, enquanto a casca, com menor conteúdo de lipídios e maior proporção de compostos hidrofílicos como fibras, concentrou mais umidade.

Ao determinar a umidade das frações casca e amêndoa de castanhas-do-brasil secas, Lopes (2021), também obteve resultado semelhante. Na casca, o teor foi mais alto que na amêndoa ($11,4 \pm 0,2$ e $1,6 \pm 0,4\%$, respectivamente).

Esses achados evidenciam que, mesmo após o processamento térmico, a casca mantém uma capacidade superior de reter água, além de apresentar maior a_w , o que pode também representar um fator de risco para a estabilidade do produto durante o armazenamento. A presença de água disponível favorece reações de deterioração e proliferação microbiológica, tornando a fração da casca um ponto crítico para o controle da qualidade.

A secagem, portanto, trata-se de uma das principais etapas para beneficiamento das castanhas, visto que a redução da umidade e,

consequentemente, da a_w é capaz de impedir o crescimento de fungos. O *Codex Alimentarius* (CAC/RPC, 2005) recomenda que após a coleta a umidade das castanhas seja reduzida até uma faixa de segurança. De acordo com o Programa de alimentos Seguros (PAS, 2004), a castanha é considerada segura quando abaixo de 13% de umidade (abaixo da umidade crítica de 15%). Os teores de umidade determinados das castanhas secas pela cooperativa estão abaixo dessa faixa.

A instrução normativa nº 11 de 22/03/2010 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2010), estabelece que a a_w de castanhas-do-brasil deve ser monitorada a fim de que permaneça abaixo de 0,7 evitando, assim, o desenvolvimento de microrganismos patogênicos. Ainda que abaixo, as castanhas secas pela cooperativa apresentaram a_w muito próxima deste limite.

De modo geral, os resultados reforçam a importância de considerar a influência do lote e das frações no comportamento higroscópico da castanha-do-brasil. Embora a casca exiba tendência de concentrar mais umidade em todos os estados, a disponibilidade desta água (refletida na a_w) pode variar de acordo com a condição do material (*in natura* ou seco). Esses achados têm implicações práticas importantes para o planejamento do armazenamento e para a definição de estratégias de secagem mais eficazes, já que a casca, por sua natureza, não apenas retém mais água, mas pode também mantê-la em uma forma mais propensa à migração interna ou ao suporte de crescimento microbiano mesmo após a secagem.

A compreensão acerca da distribuição e disponibilidade de água no produto é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de secagem e armazenamento mais eficazes, com especial atenção ao controle de umidade e atividade de água da casca, que tende a ser que tende a ser o componente mais crítico para a estabilidade do produto.

Dimensões e massas

A caracterização morfométrica de castanhas-do-brasil provenientes das regiões de Juara e Aripuanã revelou diferenças estruturais estatisticamente significativas entre os materiais analisados (Tabelas 8 a 10). A massa média da castanha *in natura* do lote Aripuanã foi de 8 ± 1 g, enquanto o lote Juara apresentou $5,9 \pm 0,6$ g, representando um acréscimo de aproximadamente 36% na massa das castanhas de Aripuanã em relação às de Juara. O teste t indicou diferença significativa entre os lotes ($p < 0,05$; $t = 12,31 > t \text{ crítico} = 2,0$).

Tabela 8. **Massa das castanhas inteiras e das frações (amêndoa e casca) dos lotes Juara e Aripuanã *in natura*.**

Frações	Massa (g)	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Castanha inteira	$5,9 \pm 0,6^b$	$8,4 \pm 1,2^a$
Amêndoa	$2,6 \pm 0,3^b$	$4 \pm 0,6^a$
Casca	$3,3 \pm 0,4^b$	$4,5 \pm 0,6^a$

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Tabela 9. **Dimensões das castanhas Juara e Aripuanã *in natura*.**

Dimensões (cm)	Castanhas	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Comprimento	$3,6 \pm 0,3^b$	$4,3 \pm 0,4^a$
Largura	$2,4 \pm 0,2^b$	$2,6 \pm 0,2^a$
Espessura	$1,7 \pm 0,1^b$	$1,9 \pm 0,2^a$
Espessura da casca	$0,14 \pm 0,01^b$	$0,18 \pm 0,02^a$

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Tabela 10. Dimensões das amêndoas Juara e Aripuanã *in natura*.

Dimensões (cm)	Amêndoa	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Comprimento	2,7 ± 0,3 ^b	3,5 ± 0,3 ^a
Largura	1,5 ± 0,1 ^b	1,6 ± 0,2 ^a
Espessura	1,2 ± 0,1 ^b	1,3 ± 0,1 ^a

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Padrão semelhante foi constatado na fração comestível, com amêndoas de massa média de $4 \pm 0,6$ g no lote Aripuanã e $2,6 \pm 0,3$ g no lote Juara, resultando em uma diferença de cerca de 54% na massa, também estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 12,83 > t \text{ crítico} = 2,0$). A casca apresentou massa média de 4 ± 1 g na Aripuanã e $3,3 \pm 0,4$ g na Juara, com diferença significativa ($p < 0,05$; $t = 6,57 > t \text{ crítico} = 2,0$). Esses dados apontam para sementes mais desenvolvidas e com maior proporção de biomassa no material oriundo de Aripuanã, o que pode refletir tanto diferenças genéticas quanto variações nas condições ambientais das regiões de coleta.

As dimensões físicas das castanhas acompanharam a tendência observada nas massas. O comprimento médio determinado das castanhas de Aripuanã ($4,3 \pm 0,4$ cm) foi cerca de 20% superior ao do lote Juara ($3,6 \pm 0,3$ cm), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 10,36 > t \text{ crítico} = 2,0$). A largura e a espessura também foram significativamente maiores nas castanhas de Aripuanã, com médias de $2,6 \pm 0,2$ cm e $1,9 \pm 0,2$ cm, frente a $2,4 \pm 0,2$ cm e $1,7 \pm 0,1$ cm nas castanhas de Juara, com diferenças confirmadas pelo teste t (largura: $p < 0,05$; $t = 6,48 > t \text{ crítico} = 2,0$; espessura: $p < 0,05$; $t = 7,63 > t \text{ crítico} = 2,0$). A espessura da casca, parâmetro relevante do ponto de vista físico e industrial, foi $0,18 \pm 0,02$ cm em Aripuanã e $0,14 \pm 0,01$ cm em Juara, sendo a diferença também significativa ($p < 0,05$; $t = 11,7 > t \text{ crítico} = 2,0$). A maior espessura e massa da casca nesse lote indicam uma estrutura externa mais robusta, possivelmente associada a maior proteção natural.

No que se refere à amêndoa, o lote Aripuanã também apresentou dimensões significativamente superiores em todos os parâmetros analisados. O comprimento médio foi de $3,5 \pm 0,3$ cm, cerca de 30% maior que o de Juara

($2,7 \pm 0,3$ cm), com diferença altamente significativa ($p < 0,05$; $t = 14,26 > t$ crítico = 2,0). A largura das amêndoas foi de $1,6 \pm 0,2$ cm em Aripuanã, superior à observada em Juara ($1,5 \pm 0,1$ cm), com diferença confirmada estatisticamente ($p = 0,05$; $t = 4,0 > t$ crítico = 2,0). A espessura média foi de $1,3 \pm 0,1$ cm no lote Aripuanã e $1,2 \pm 0,1$ cm no lote Juara, também com diferença significativa ($p = < 0,05$; $t = 4,31 > t$ crítico = 2,0).

De forma geral, os resultados apontam que o lote Aripuanã apresenta castanhas e amêndoas mais robustas, com maiores massas e dimensões médias em todas as frações avaliadas, e essas diferenças foram estatisticamente significativas, como indicado pelo teste t. Tais variações morfológicas refletem não apenas maior desenvolvimento físico, mas também a possibilidade de comportamento distinto nas etapas de beneficiamento, como secagem e quebra, justificando estratégias operacionais adaptadas por lote. A padronização do processamento com base nessas características pode favorecer o melhor aproveitamento do produto, aumentando a eficiência industrial e a qualidade final dos derivados da castanha-do-brasil.

Composição centesimal

A análise comparativa da composição centesimal das castanhas-do-brasil dos lotes Juara e Aripuanã revelou diferenças significativas nos teores de macronutrientes entre os materiais, tanto na castanha inteira quanto nas frações amêndoa e casca (Tabelas 11 a 13).

Tabela 11. Composição centesimal de castanhas-do-brasil inteiras *in natura* dos lotes Juara e Aripuanã.

Composição (g/100 g)	Castanha	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Umidade	18,5 ± 0,6 ^a	14,3 ± 0,6 ^b
Lipídios	31,2 ± 0,4 ^b	33,4 ± 0,2 ^a
Proteínas	8,73 ± 0,07 ^b	9,9 ± 0,2 ^a
Cinzas	2,07 ± 0,06 ^a	2,26 ± 0,09 ^a
Carboidratos	39,6 ± 0,3 ^a	40,10 ± 0,03 ^a
Valor calórico (Kcal/100g)	473,77	500,40

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Tabela 12. Composição centesimal de amêndoas *in natura* dos lotes Juara e Aripuanã.

Composição (g/100 g)	Amêndoa	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Umidade	12,1 ± 0,3 ^a	9,6 ± 0,2 ^b
Lipídios	62,4 ± 0,1 ^b	65,5 ± 0,2 ^a
Proteínas	18,9 ± 0,1 ^b	20,16 ± 0,03 ^a
Cinzas	2,9 ± 0,2 ^a	2,2 ± 0,3 ^b
Carboidratos	3,6 ± 0,4 ^a	2,51 ± 0,03 ^b
Valor calórico (Kcal/100g)	651,50	680,32

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Tabela 13. Composição centesimal das cascas das castanhas *in natura* dos lotes Juara e Aripuanã.

Composição (g/100 g)	Casca	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Umidade	25 ± 1 ^a	22,8 ± 0,6 ^b
Lipídios	3,80 ± 0,05 ^b	4,03 ± 0,2 ^a
Proteínas	1,6 ± 0,2 ^a	1,765 ± 0,004 ^a
Cinzas	1,6 ± 0,3 ^a	1,1 ± 0,3 ^a
Carboidratos	68,5 ± 0,2 ^b	70,2 ± 0,3 ^a
Valor calórico (Kcal/100g)	314,23	324,25

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste t ($p < 0,05$).

Na castanha inteira, o lote Aripuanã apresentou teores significativamente mais elevados de lipídios ($33,4 \pm 0,3\%$) em comparação a Juara ($31,2 \pm 0,4\%$), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 8,87 > t \text{ crítico} = 3,18$). Da mesma forma, o teor de proteínas foi maior em Aripuanã ($9,9 \pm 0,2\%$) do que em Juara ($8,73 \pm 0,07\%$), também com diferença significativa ($p < 0,05$; $t = 12,45 > t \text{ crítico} = 3,18$). Em relação às cinzas, Aripuanã apresentou teor ligeiramente maior ($2,26 \pm 0,09\%$) do que Juara ($2,04 \pm 0,03\%$), porém essa diferença não foi estatisticamente significativa ($p = 0,062 > 0,05$; $|t| = 3,83 < t \text{ crítico} = 4,30$). Para o teor de carboidratos, não houve diferença estatisticamente significativa entre Aripuanã ($40,10 \pm 0,03\%$) e Juara ($39,6 \pm 0,1\%$) ($p = 0,10 > 0,05$; $|t| = 2,85 < t \text{ crítico} = 4,30$). Esses resultados indicam que, na castanha como um todo, o lote Aripuanã possui maior densidade energética e proteica.

A análise dos valores calóricos das castanhas inteiras reforça essa conclusão: o lote Aripuanã apresentou maior valor energético ($500,40 \text{ kcal}/100 \text{ g}$) em relação a Juara ($473,77 \text{ kcal}/100 \text{ g}$), refletindo diretamente seus maiores teores de lipídios e proteínas. Essa diferença calórica representa uma vantagem nutricional no contexto de uso da castanha como fonte energética natural.

Na fração amêndoa, o lote Aripuanã novamente apresentou teores mais elevados de lipídios ($65,5 \pm 0,2\%$) em relação ao lote Juara ($62,4 \pm 0,2\%$), com diferença altamente significativa ($p < 0,05$; $t = 20,81 > t \text{ crítico} = 4,30$). O mesmo ocorreu para as proteínas, com Aripuanã registrando $20,16 \pm 0,04\%$, valor significativamente superior ao de Juara ($18,9 \pm 0,1\%$), com $p < 0,05$ ($t = 20,10 > t \text{ crítico} = 4,30$). Para o teor de cinzas, no entanto, o lote Juara apresentou valor maior ($2,9 \pm 0,2\%$) que Aripuanã ($2,2 \pm 0,3\%$), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 3,72 > t \text{ crítico} = 2,78$). Quanto aos carboidratos, Juara apresentou teor significativamente maior ($3,6 \pm 0,4\%$) do que Aripuanã ($2,5 \pm 0,03\%$), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 4,54 > t \text{ crítico} = 4,30$).

A superioridade de Aripuanã em termos calóricos se refletiu nos valores energéticos das amêndoas, que foram de $680,32 \text{ kcal}/100 \text{ g}$ para Aripuanã e $651,50 \text{ kcal}/100 \text{ g}$ para Juara, diferença que destaca a amêndoa de Aripuanã como a mais energética entre todas as frações analisadas.

Na fração casca, o teor de lipídios foi significativamente superior em Aripuanã ($4,0 \pm 0,2\%$) em comparação a Juara ($3,80 \pm 0,05\%$), com $p < 0,05$ ($t = 3,50 > t \text{ crítico} = 3,18$). As proteínas, embora numericamente maiores nas castanhas de Aripuanã ($1,765 \pm 0,004\%$) que de Juara ($1,6 \pm 0,3\%$), não apresentaram diferença estatisticamente significativa ($p > 0,05$; $t = 2,23 < t \text{ crítico} = 4,30$). Para o teor de cinzas, também não houve diferença estatisticamente significativa entre Juara ($1,6 \pm 0,3\%$) e Aripuanã ($1,1 \pm 0,3\%$) ($p = 0,11 > 0,05$; $t = 2,02 < t \text{ crítico} = 2,78$). Em relação aos carboidratos, Aripuanã apresentou teor significativamente maior ($70,2 \pm 0,3\%$) do que Juara ($68,5 \pm 0,2\%$), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 9,44 > t \text{ crítico} = 2,78$).

Do ponto de vista energético, a casca também apresentou variação entre os lotes: Aripuanã obteve valor calórico de 324,25 kcal/100g, enquanto Juara apresentou 314,23 kcal/100g. Embora ambos os valores sejam inferiores aos da amêndoa, ainda revelam uma fração com potencial energético considerável, sobretudo quando se pensa em aplicações para aproveitamento integral ou formulações com alto teor de fibra.

De modo geral, os resultados apontam para uma composição mais concentrada em nutrientes energéticos e proteicos no lote Aripuanã, especialmente na fração comestível (amêndoa), com maiores teores de lipídios e proteínas. O lote Juara, por sua vez, apresentou teores mais elevados de cinzas na amêndoa. A casca apresentou, como esperado, baixos teores de lipídios e proteínas em ambos os lotes, e alta concentração de carboidratos.

Complementarmente, a composição centesimal da castanha-do-brasil evidencia de forma clara o impacto da proporção mássica entre casca e amêndoa sobre o valor nutricional da semente quando analisado em sua forma íntegra. Os dados de massa apresentados anteriormente (Tabela 8) mostram que, para Juara e Aripuanã, a casca representa, em média, 56 e 54%, respectivamente, da massa total da castanha, enquanto a amêndoa corresponde a 44 e 48%, respectivamente. Essa predominância da fração menos nutritiva interfere diretamente nos teores finais dos macrocomponentes quando se considera a castanha como um todo, promovendo um efeito de

diluição que compromete, do ponto de vista nutricional e tecnológico, o aproveitamento integral do fruto.

Os teores de lipídios, proteínas, carboidratos e valor energético determinados nas amêndoas Juara e Aripuanã, apresentaram-se dentro da faixa descrita na literatura por outros autores, como observado na Tabela 1.

É importante destacar que, até o momento, não foram encontrados na literatura científica trabalhos que apresentem a caracterização centesimal da castanha-do-brasil em sua forma íntegra (casca + amêndoa), sendo mais comum a descrição apenas da fração comestível, ou seja, da amêndoa. A caracterização global da castanha, assim como a análise separada por frações, oferece uma compreensão mais abrangente do valor nutricional e tecnológico desse material. Essa abordagem é especialmente relevante para subsidiar decisões em processos industriais, formulações alimentícias e estratégias de aproveitamento integral da castanha, principalmente, em iniciativas voltadas à agregação de valor e ao uso sustentável dos coprodutos, como a casca, que pode ser fonte de fibras e compostos bioativos.

Composição de ácidos graxos do óleo das amêndoas *in natura*

Ao avaliar a composição lipídica de óleo extraído por Soxhlet com n-hexano das amêndoas *in natura* Juara e Aripuanã, foram identificados no total 6 ácidos graxos, entre saturados e insaturados (Figuras 29 e 30 e Tabela 14).

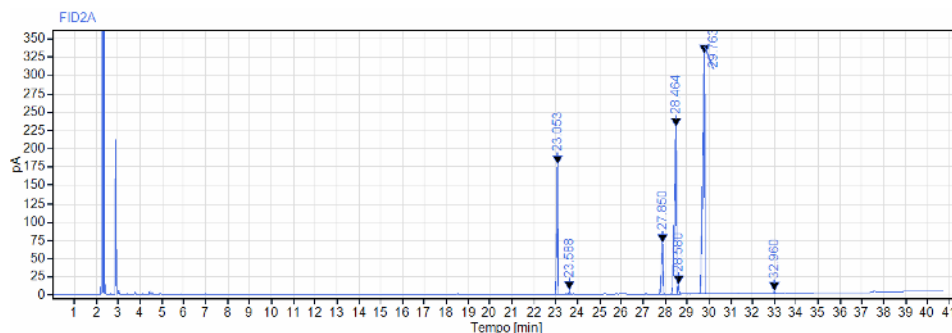


Figura 29. Cromatograma do óleo da amêndoa *in natura* de Juara.

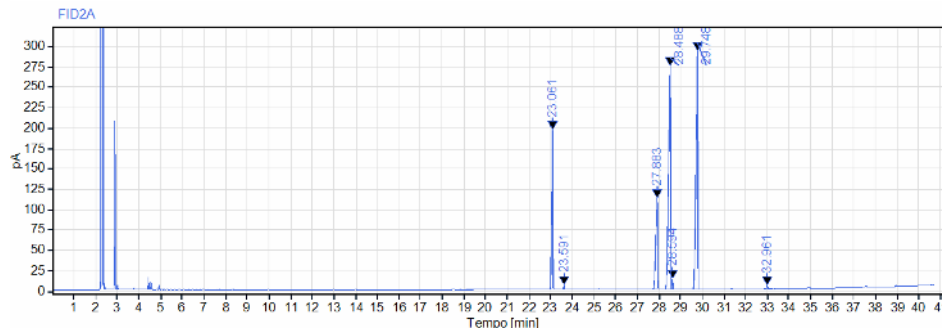


Figura 30. Cromatograma do óleo da amêndoa *in natura* de Aripuanã.

Tabela 14. Composição em ácidos graxos e acidez do óleo das amêndoas *in natura* dos lotes Juara e Aripuanã.

Ácido graxo*	Composição (%)	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
C16:0	14,22	14,79
C16:1	0,33	0,32
C18:0	8,17	13,01
C18:1	29,98	35,92
C18:2	46,05	34,71
C18:3	0,23	0,39
Não identificado	1,01	0,86
Saturados	22,39	27,8
Insaturados	76,59	71,34
Total	100	100
Acidez (%)	0,47 ± 0,002	0,37 ± 0,002

*Cx:y, onde x é o número de carbonos na cadeia do ácido graxo e y é o número de insaturações na cadeia carbônica.

Os resultados confirmam a predominância de ácidos graxos insaturados (Tabela 14), característica marcante da castanha-do-brasil, conforme já descrito na literatura. Segundo Santos et al. (2013), os lipídios da espécie são compostos majoritariamente por insaturados, com cerca de 37%

de ácido linoleico (C18:2), 33% de ácido oleico (C18:1), 14% de ácido palmítico (C16:0) e 11% de ácido esteárico (C18:0).

Nas amêndoas do lote Juara, o ácido linoleico (C18:2) foi o mais abundante (46,05%), seguido pelo ácido oleico (C18:1, 29,98%), palmítico (C16:0, 14,22%) e esteárico (C18:0, 8,17%). Já no lote Aripuanã, o perfil se manteve semelhante, mas com inversão entre os dois principais insaturados: o ácido oleico foi predominante (35,92%), enquanto o linoleico representou 34,71% do total, e os teores de palmítico (14,79%) e esteárico (13,01%) também se mostraram compatíveis com os valores previamente reportados.

Embora fatores ambientais como tipo de solo, pluviosidade e intensidade de luz solar possam influenciar a composição do óleo, os estudos apontam que a distribuição dos ácidos graxos da castanha-do-brasil tende a apresentar baixa variabilidade entre diferentes origens (Freitas et al., 2007; Santos et al., 2012; Santos et al., 2013). Esse padrão também foi observado nos lotes avaliados, que, apesar das diferenças quantitativas, mantiveram a hierarquia de ácidos graxos majoritários.

Além disso, a elevada proporção de ácidos graxos insaturados (76,59% na castanha de Juara e 71,34% na castanha de Aripuanã) reforça o potencial nutricional e funcional do óleo, com destaque para os ácidos linoleico e oleico. A maior concentração de ácido linoleico nas castanhas do lote Juara pode representar um diferencial positivo em formulações com foco em ácidos graxos essenciais da série ômega-6, enquanto o perfil ligeiramente mais concentrado de ácido oleico da castanha de Aripuanã pode conferir maior estabilidade oxidativa ao óleo, favorecendo sua aplicação em produtos com maior tempo de prateleira.

O índice de acidez não deve ultrapassar o limite máximo de 4,0 mgNaOH/g ou no máximo 2,0% de ácido oleico segundo a Resolução RDC nº 270, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, (Brasil, 2005).

A determinação de acidez revelou que o óleo extraído das amêndoas dos lotes Juara e Aripuanã apresentou valores médios de 0,66 e 0,53 mgNaOH/g, respectivamente. Esses valores estão, portanto, muito abaixo do limite máximo estabelecido pela ANVISA para óleos e gorduras vegetal, indicando boa qualidade e baixa ocorrência de hidrólise de triglicerídeos nas amostras analisadas.

Análise colorimétrica das castanhas Juara e Aripuanã *in natura*

A análise colorimétrica das castanhas-do-brasil *in natura* evidenciou diferenças significativas entre os lotes Juara e Aripuanã, especialmente nas frações de amêndoa e casca (Figura 31).

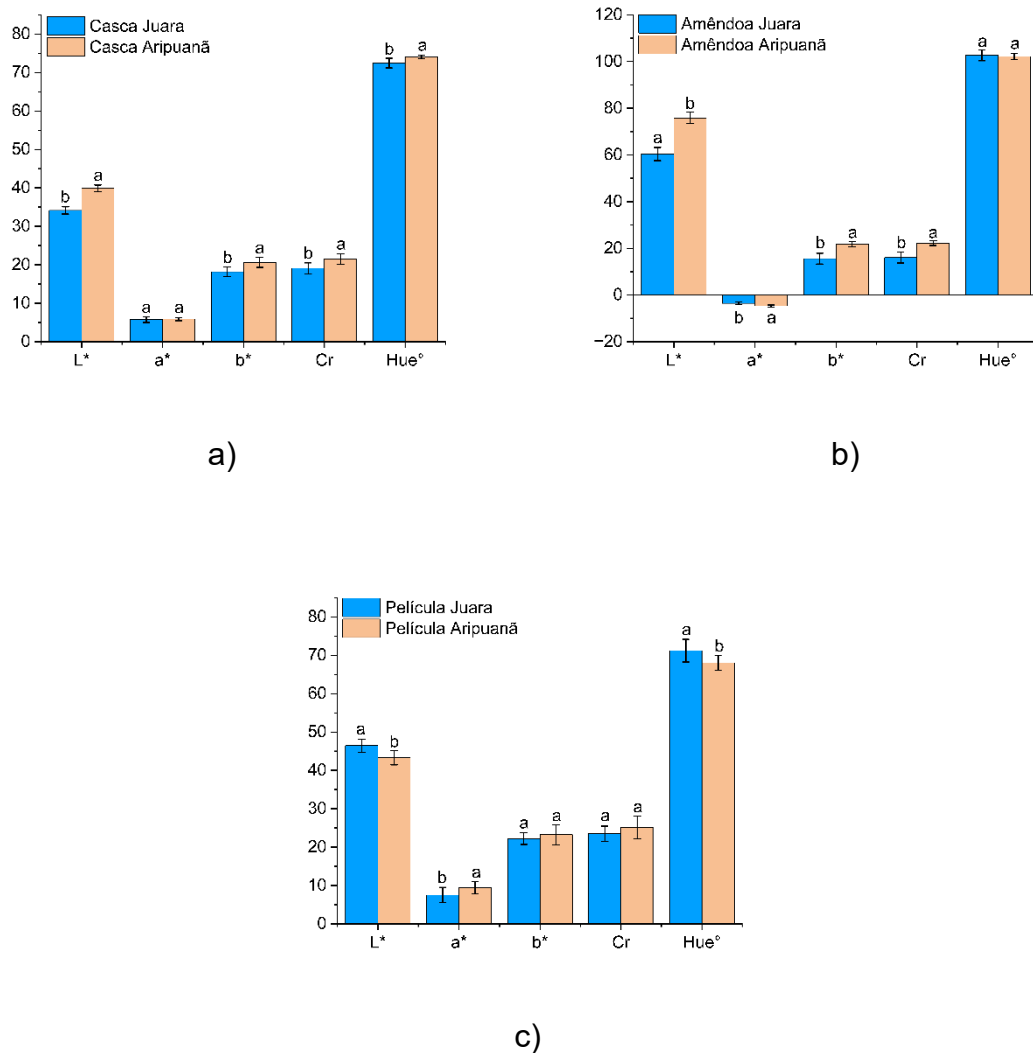


Figura 31. Parâmetros de cor da casca (a), amêndoa (b) e película (c) de castanhas Juara e Aripuanã *in natura*. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na casca, o lote Aripuanã apresentou valor médio de luminosidade (coordenada L^*) significativamente superior ($39,9 \pm 0,9$) ao observado no lote Juara ($34,1 \pm 0,9$), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 13,95 > t \text{ crítico} = 2,10$), sugerindo coloração mais clara em Aripuanã. Para a coordenada a^* (verde-vermelho), que expressa a tonalidade avermelhada ($a^* > 0$), não houve diferença significativa entre os lotes ($p = 0,67$; $t = 0,54 < t \text{ crítico}$), com valores médios semelhantes (Juara: $5,8 \pm 0,8$; Aripuanã: $5,9 \pm 0,4$), indicando tonalidade levemente avermelhada e equivalente.

Na coordenada b^* (azul-amarelo), a casca de Aripuanã apresentou valor médio significativamente mais alto (21 ± 1) que Juara (18 ± 1), com diferença estatística confirmada ($p < 0,05$; $t = 4,21 > t \text{ crítico} = 2,10$). Como resultado, o croma (C^*), que expressa a saturação da cor, também foi significativamente maior em Aripuanã (22 ± 1) frente a Juara (19 ± 1) ($p < 0,05$; $t = 3,81 > t \text{ crítico} = 2,10$), evidenciando coloração mais intensa na casca do primeiro lote. Para o ângulo de matiz (ângulo Hue), Aripuanã apresentou valor médio discretamente superior ($74,1 \pm 0,5^\circ$) em relação a Juara ($72 \pm 1^\circ$), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 3,82 > t \text{ crítico} = 2,20$), indicando tonalidade levemente mais amarelada no lote Aripuanã. Em conjunto, esses dados indicam que a casca do lote Aripuanã apresenta coloração mais clara, mais amarela e mais saturada que a de Juara.

Na amêndoa, as diferenças entre os lotes foram ainda mais marcantes. A coordenada L^* foi significativamente mais alta em Aripuanã (76 ± 2) do que em Juara (60 ± 3), com forte evidência estatística ($p < 0,05$; $t = 13,08 > t \text{ crítico} = 2,10$), revelando amêndoas consideravelmente mais claras no primeiro lote. Para a coordenada a^* , os valores foram negativos em ambos os lotes, caracterizando coloração com tendência esverdeada, sendo o valor mais negativo em Aripuanã ($-4,7 \pm 0,5$) do que em Juara ($-3,6 \pm 0,6$), com diferença significativa ($p < 0,05$; $t = 4,65 > t \text{ crítico} = 2,11$), indicando tonalidade com maior tendência ao verde no lote Aripuanã.

A coordenada b^* também foi significativamente maior em Aripuanã (22 ± 1) frente a Juara (16 ± 2) ($p < 0,05$; $t = 7,61 > t \text{ crítico} = 2,16$), assim como o croma (C^*), que foi mais elevado no Aripuanã (22 ± 1) do que no Juara (16 ± 2), com diferença altamente significativa ($p < 0,05$; $t = 7,82 > t \text{ crítico} = 2,16$). O ângulo Hue, por sua vez, não apresentou diferença significativa ($p =$

0,60; $t = 0,54 < t \text{ crítico} = 2,13$), indicando que a tonalidade predominante, amarelado-esverdeada é semelhante em ambos os lotes. Dessa forma, as diferenças de cor observadas se devem, principalmente, a maior luminosidade, saturação e intensidade dos tons amarelados e esverdeados no lote Aripuanã, que se destaca como o componente com maior potencial discriminatório entre os lotes.

Na película, as diferenças entre os lotes foram mais sutis. O valor da coordenada L^* foi estatisticamente mais alto no Juara (46 ± 2) do que em Aripuanã (43 ± 2), com significância ($p < 0,05$; $t = 3,91 > t \text{ crítico} = 2,10$). A coordenada a^* foi significativamente maior em Aripuanã (9 ± 2) frente a Juara (8 ± 2), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$; $t = 2,37 > t \text{ crítico} = 2,11$), indicando tendência para tons avermelhados mais pronunciados no lote Aripuanã. Os valores de b^* (Juara: 22 ± 2 e Aripuanã: 23 ± 3) e de croma (Juara: 24 ± 2 e Aripuanã: 25 ± 3) não apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p = 0,31$ e $p = 0,18$, respectivamente), sugerindo coloração amarela e saturação sem variação relevante entre os lotes. Por fim, o ângulo Hue foi significativamente mais elevado no Juara ($71 \pm 3^\circ$) que em Aripuanã ($68 \pm 2^\circ$) ($p < 0,05$; $t = 2,88 > t \text{ crítico} = 2,13$), indicando tonalidade ligeiramente mais alaranjada no primeiro lote.

Os resultados do teste t reforçam que a amêndoa foi a fração com maior diferença colorimétrica entre os lotes, com valores significativamente superiores em Aripuanã para os parâmetros L^* , a^* (mais negativo), b^* , Cr e, em menor grau, o ângulo Hue, configurando uma coloração mais clara, amarela e esverdeada. A casca também apresentou diferenças significativas, especialmente em L^* , b^* , Cr e ângulo Hue, com o lote Aripuanã apresentando coloração mais clara e saturada. A película, por outro lado, revelou menores contrastes, com algumas diferenças estatísticas em L^* e ângulo Hue, mas sem alterações importantes em saturação ou amarelo (b^*). Tais achados indicam que a coloração da castanha-do-brasil pode ser significativamente influenciada pela origem do lote, especialmente quando observada na amêndoa, sugerindo potencial aplicação desses parâmetros na caracterização, seleção e padronização de qualidade visual do produto.

Isotermas de dessecção

Na Tabela 15 estão apresentados os dados experimentais de atividade de água (a_w) e umidade para os lotes Juara e Aripuanã submetidos às isotermas de dessecção a 60 °C. Para cada solução salina saturada, foi determinada a umidade e a_w de 3 repetições.

Tabela 15. **Valores médios de atividade de água (a_w) e umidade experimentais das amostras de castanhas-do-brasil inteiras após o equilíbrio nas isotermas de dessecção a 60 °C.**

a_w a 25°C*	a_w a 60°C*	Lote Juara		Lote Aripuanã	
		a_w	Umidade (%b.s.)	a_w	Umidade (%b.s.)
0,0824 ± 0,0210	0,0361 ± 0,0065	0,0706 ± 0,0088	1,4 ± 0,2	0,0506 ± 0,0061	1,9 ± 0,2
0,3278 ± 0,0016	0,2926 ± 0,0018	0,2282 ± 0,0073	2,6 ± 0,3	0,2320 ± 0,0091	3,3 ± 0,3
0,5757 ± 0,0040	0,4966 ± 0,0078	0,3382 ± 0,0049	4,2 ± 0,5	0,3358 ± 0,0154	4,4 ± 0,9
0,6492 ± 0,0350	0,4674 ± 0,0150	0,4307 ± 0,0103	5,8 ± 0,4	0,4200 ± 0,0127	6,0 ± 0,7
0,7425 ± 0,0032	0,6735 ± 0,0057	0,4628 ± 0,0069	6,4 ± 0,5	0,4488 ± 0,0074	7,0 ± 0,7
0,7529 ± 0,0012	0,7450 ± 0,0030	0,5481 ± 0,0048	7,0 ± 0,5	0,5470 ± 0,0158	7,4 ± 0,6
0,8434 ± 0,0026	0,8025 ± 0,0041	0,6055 ± 0,0189	8,4 ± 0,6	0,6010 ± 0,0426	7,9 ± 0,9

*Valores de atividade de água dos sais utilizados a 25 e 60 °C descritos por Greenspan (1977)

Os valores de umidade das castanhas-do-brasil inteiras obtidos experimentalmente foram dependentes da a_w (Figura 32), ou seja, o aumento do teor de umidade é resultante da elevação desta variável, corroborando com diversos trabalhos realizados sobre o assunto (SILVA et al., 2015; COSTA et al., 2015; FERREIRA JUNIOR et al., 2018).

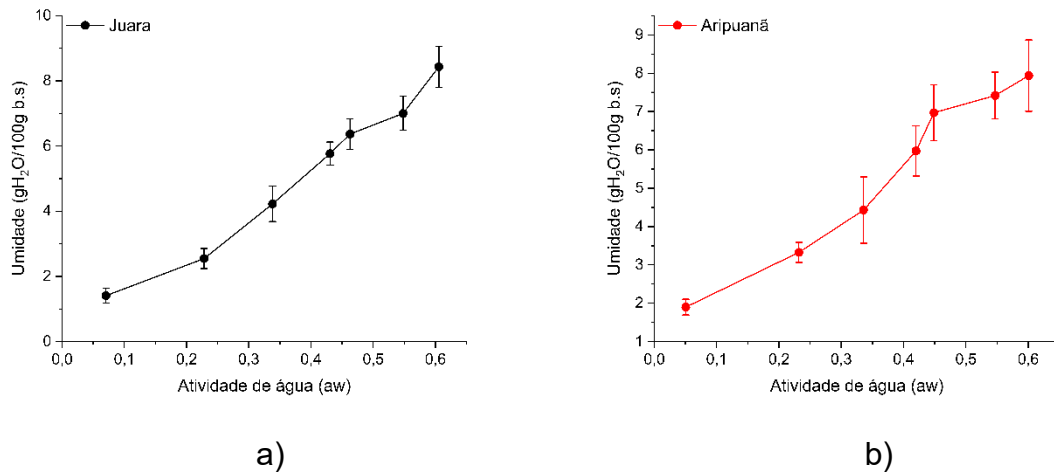


Figura 32. **Isotermas de dessorção experimentais a 60° C. a) Castanhas Juara, b) Castanhas Aripuanã.**

A partir do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da isoterma de dessorção a 60 °C, foram obtidos os valores dos parâmetros analisados para verificação do grau de ajuste (Tabelas 16 e 17).

Tabela 16. **Parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais das castanhas-do-brasil do lote Juara submetidas a isoterma de dessorção a 60 °C.**

Modelos	Parâmetros	SE	X ²	P	R ²
		decimal			(%)
BET	Xm= 3,76** C= 5,80**	0,461	0,212	9,66	96,49
BET modificado	Xm= 6,39 ^{ns} C= 2,26 ^{ns} K= 0,75**	0,443	0,196	10,80	96,93
GAB	Xm= 6,39 ^{ns} C=3,01* K= 0,75**	0,443	0,196	10,80	96,93
GAB modificado	Xm= 6,39 ^{ns} C= 3,01* K= 0,75**	0,443	0,196	10,80	96,93

**Significativo a p = 0,01 pelo teste t; * Significativo a p = 0,05 pelo teste t; ^{ns}Não significativo pelo teste t;

Tabela 17. **Parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã submetidas a isoterma de dessorção a 60°C.**

Modelos	Parâmetros	SE	X ²	P	R ²
		decimal			(%)
BET	Xm= 3,49**	0,706	0,499	10,42	90,32
	C= 18,09*				
BET modificado	Xm= 4,44**	0,687	0,472	12,28	91,33
	C= 8,29 ^{ns}				
	K= 0,84**				
GAB	Xm= 4,44**	0,687	0,472	12,28	91,33
	C= 9,82*				
	K= 0,84**				
GAB modificado	Xm= 4,44**	0,687	0,472	12,28	91,33
	C= 9,82*				
	K= 0,84**				

**Significativo a $p = 0,01$ pelo teste t; *Significativo a $p = 0,05$ pelo teste t; ^{ns}Não significativo pelo teste t;

A escolha criteriosa de modelos matemáticos para o ajuste das isotermas de dessorção das castanhas-do-brasil é crucial para a compreensão do comportamento higroscópico deste alimento, especialmente na definição da umidade da monocamada (X_m), parâmetro especialmente relevante por indicar a quantidade de água firmemente adsorvida em locais específicos da superfície do alimento. De acordo com Gabas et al. (2009), esse valor é de grande interesse, pois define o teor de água mais fortemente ligado a matriz, sendo considerado o ideal para garantir a estabilidade físico-química e microbiológica do produto. Neste estudo, foram avaliados os modelos semiempíricos BET, BET modificado, GAB e GAB modificado, com base nos dados experimentais obtidos para os lotes Juara e Aripuanã.

No lote Juara, o modelo BET apresentou significância estatística para ambos os parâmetros ($X_m = 3,76^{**}$; $C = 5,80^{**}$), e o menor valor de erro médio relativo ($P = 9,66\%$), o que indica boa adequação ao fenômeno segundo o critério de Mohapatra & Rao (2005), que recomendam valores de P inferiores a 10% para validação do modelo. O coeficiente de determinação ($R^2 = 96,49\%$) também confirma um ajuste satisfatório. No entanto, o modelo

apresentou o maior erro médio estimado ($SE = 0,461$), o que pode indicar menor precisão quando comparado aos demais modelos. De acordo com Draper & Smith (1998), valores menores para o erro médio estimado indicam melhor ajuste ao modelo, o que favorece os demais ajustes.

Já os modelos BET modificado, GAB e GAB modificado apresentaram valores estatísticos idênticos entre si ($SE = 0,443$; $X^2 = 0,196$; $P = 10,80\%$; $R^2 = 96,93\%$), o que evidencia um desempenho similar na representação da isoterma. Contudo, ao se considerar a significância estatística dos parâmetros estimados, observa-se que o modelo BET modificado apresentou ausência de significância para os coeficientes X_m e C . O modelo GAB também não apresentou significância para X_m , embora os parâmetros $C = 3,01^*$ e $K = 0,75^{**}$ tenham sido significativos. No modelo GAB modificado, os mesmos coeficientes mantiveram a significância (C^* e K^{**}), sem ganho estatístico em relação à forma tradicional. Assim, o uso da constante T (temperatura) no GAB modificado não promoveu alterações no ajuste em relação ao GAB, o que indica que o modelo GAB tradicional é suficiente e apropriado para representar a isoterma de dessorção do lote Juara.

No lote Aripuanã, o modelo BET também apresentou significância para ambos os coeficientes ($X_m = 3,49^{**}$; $C = 18,09^*$), e valores aceitáveis de ajuste ($SE = 0,706$; $X^2 = 0,499$; $P = 10,42\%$; $R^2 = 90,32\%$). Contudo, os demais modelos testados apresentaram desempenho superior, tendo coeficiente de rendimento igual à $91,33\%$, com exceção do erro médio relativo ($P = 12,28\%$), que ultrapassou ligeiramente o limite recomendado. Apesar disso, o modelo BET modificado teve ausência de significância para o parâmetro C , o que compromete sua interpretação físico-química. Por outro lado, os modelos GAB e GAB modificado apresentaram todos os parâmetros significativos, com $X_m = 4,44^{**}$; $C = 9,82^*$ e $K = 0,84^{**}$, mantendo também desempenho estatístico consistente.

Ao determinar isotermas de dessorção de amêndoas de castanhas-do-brasil, Bitencourt (2020), constatou que o modelo GAB modificado também pode ser utilizado na representação das mesmas. Entretanto, assim como observado no lote Juara, a introdução da constante T no GAB modificado não resultou em melhorias no ajuste, reforçando que o modelo GAB tradicional já é adequado para a representação da isoterma.

Portanto, com base na significância estatística dos parâmetros, no bom desempenho dos critérios de ajuste e na possibilidade de interpretação físico-química dos coeficientes, escolheu-se o modelo GAB tradicional para representar as isotermas de dessorção a 60 °C nos dois lotes avaliados (Juara e Aripuanã) (Figura 33).

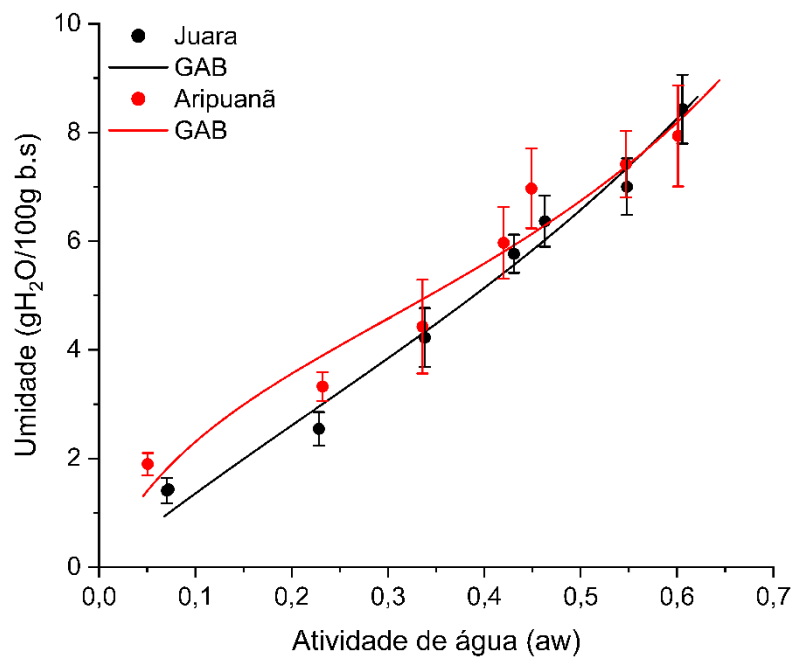


Figura 33. **Isotermas de dessorção experimentais a 60 °C dos lotes Juara e Aripuanã e respectivos ajustes matemáticos pelo modelo de GAB.**

Ao analisar melhor os parâmetros obtidos através do ajuste matemático do modelo GAB, o lote Juara apresentou maior valor de X_m (6 ± 3 g H₂O/100 g b.s.) em comparação com Aripuanã ($4,4 \pm 0,9$ g H₂O/100 g b.s.), sugerindo maior capacidade de retenção inicial de água. Essa diferença pode estar relacionada à menor massa e dimensão das castanhas Juara, resultando em maior área superficial por unidade de massa. No entanto, a significância estatística da estimativa de X_m foi mais robusta em Aripuanã ($p < 0,01$),

enquanto para Juara o p-valor de 0,08 reduz a confiabilidade da estimativa, apesar do bom ajuste global.

Em relação ao parâmetro C, associado à afinidade da água com os sítios da monocamada, Aripuanã alcançou $C = 9,82 \pm 4,72$ ($p = 0,05$), enquanto Juara apresentou $C = 3,1 \pm 1,43$ ($p = 0,049$). Já o parâmetro K, que descreve a energia de ligação da água nas multicamadas, foi de $0,84 \pm 0,13$ ($p < 0,01$) para Aripuanã e $0,75 \pm 0,23$ ($p = 0,01$) para Juara. Segundo Blahovec (2004), os valores de C e K também servem para classificar o tipo de isoterma. Quando $C > 2$ e $0 < K \leq 1$, a isoterma pode ser considerada do tipo II, conforme a classificação de Brunauer et al. (1938). Ambos os lotes atenderam a esse critério, o que é coerente com a forma sigmoideal observada e com a natureza higroscópica da castanha-do-brasil.

As isotermas de sorção de umidade do tipo II descrevem como a água se liga aos alimentos à medida que a atividade de água (a_w) aumenta. Em valores baixos de a_w , a água está firmemente presa aos componentes do alimento, formando uma camada única ligada por forças químicas. Em níveis intermediários, começa a formação de várias camadas de água e o preenchimento de poros menores, fenômenos influenciados por efeitos capilares. Já em a_w mais altas, ocorrem inchaço da matriz, preenchimento de poros maiores e dissolução de solutos, o que provoca um rápido aumento no teor de umidade (Labuza & Altunakar, 2008). Esse comportamento é típico de muitos produtos vegetais.

Em termos físico-químicos, os parâmetros estimados foram mais consistentes no lote Aripuanã. Valores mais elevados de C indicam maior afinidade da água com os sítios energéticos primários, enquanto K mais próximo de 1 sugere maior estabilidade das multicamadas formadas. Esses fatores indicam que a água adsorvida em Aripuanã tende a permanecer mais fortemente retida, mesmo com o aumento da a_w . Tal comportamento pode estar associado à maior espessura de casca observada nesse lote, que oferece uma barreira física mais resistente à movimentação de umidade.

A interpretação desses parâmetros permite entender melhor o comportamento higroscópico dos dois lotes e está em consonância com os dados obtidos experimentalmente. As curvas revelaram que o lote Juara sofreu maior perda de água ao longo da faixa de a_w avaliada, com inclinação

mais acentuada. Isso indica menor capacidade de retenção de água sob condições experimentais semelhantes, característica coerente com os menores valores de C e K estimados para esse lote. Em contraste, o lote Aripuanã apresentou valores de umidade de equilíbrio mais elevados em praticamente toda a faixa de a_w , o que sugere maior resistência a dessecção.

Além disso, os dados experimentais de umidade obtidos após a secagem realizada na cooperativa mostraram boa correspondência com os pontos das isotermas de dessecção. No caso do lote Juara, a umidade final observada ($8,1 \pm 0,6\%b.u.$) encontra-se próxima ao valor de $7,8 \pm 0,5\%b.u.$ previsto para $a_w \approx 0,6$ na isoterma, enquanto para Aripuanã, a umidade final de $6,9 \pm 0,7\%b.u.$ também se mostrou compatível com o valor de $7,3 \pm 0,8\%b.u.$ da respectiva curva. Isso demonstra que os dados obtidos em laboratório refletiram as condições alcançadas após a secagem realizada pela cooperativa, reforçando a validade dos modelos ajustados.

Os valores de a_w das amostras em equilíbrio com o sistema, determinados experimentalmente após o período de exposição às soluções salinas saturadas (Tabela 15), apresentaram discrepâncias com os valores de referência da literatura para os respectivos sais. De modo geral, as medições realizadas ficaram abaixo dos valores teóricos esperados para cada sal, mesmo após prolongado tempo de exposição em sistema hermético e equilíbrio higroscópico determinado pela estabilização da massa ao longo do tempo. Esse comportamento pode ser atribuído a presença da casca, que atua como uma barreira higroscópica, dificultando a difusão de vapor de água entre o interior do fruto e a atmosfera do ambiente de equilíbrio.

Na caracterização do material em frações (Tabelas 6 e 7), foram observadas diferenças significativas nos valores de a_w e umidade entre essas partes (casca e amêndoa). Tais diferenças sugerem que a distribuição interna da umidade não ocorre de maneira homogênea, sendo influenciada pela natureza física da casca. Assim, é possível que, durante o processo de dessecção em sistema hermético, a difusão da umidade interna da amêndoa para o exterior tenha sido limitada pela casca, impedindo o completo equilíbrio higroscópico com a atmosfera controlada pela solução salina. Isso reforça a hipótese de que o material, quando mantido com a casca intacta, pode não atingir plenamente o equilíbrio higroscópico com o ambiente, o que representa

um desafio experimental, mas também fornece evidência relevante sobre o papel protetivo da casca no comportamento de sorção a umidade da castanha como um todo.

Isotermas de adsorção

Na Tabela 18 estão apresentados os dados experimentais de a_w e umidade (%b.s.) para os lotes Juara e Aripuanã submetidos às isotermas de adsorção a 25 °C. Para cada solução salina saturada, foi determinada a umidade e a_w de 3 repetições.

Tabela 18. **Valores médios de atividade de água (a_w) e umidade (%b.s.) experimentais das amostras de castanhas-do-brasil inteiras após o equilíbrio higroscópico nas isotermas de adsorção a 25 °C.**

aw a 25 °C*	Lote Juara		Lote Aripuanã	
	aw	Umidade (%b.s.)	aw	Umidade (%b.s.)
0,5757 ± 0,0040	0,5377 ± 0,0141	6,8 ± 0,4	0,5279 ± 0,0084	6,1 ± 0,3
0,6492 ± 0,0350	0,5661 ± 0,0049	7,7 ± 0,4	0,5802 ± 0,0060	7,3 ± 0,5
0,7425 ± 0,0032	0,6721 ± 0,0058	8,8 ± 0,5	0,6838 ± 0,0092	8,7 ± 0,7
0,7529 ± 0,0012	0,7065 ± 0,0119	10,0 ± 0,8	0,7125 ± 0,0060	9,9 ± 0,7
0,8434 ± 0,0026	0,7717 ± 0,0087	11 ± 1	0,8021 ± 0,0031	11,5 ± 0,9

* Valores de atividade de água (a_w) dos sais utilizados a 25 e 60 °C descritos por Greenspan (1977)

Assim como na dessorção, os valores de a_w das castanhas-do-brasil inteiras obtidos experimentalmente nas isotermas de adsorção também foram dependentes dos teores de água (Figura 34).

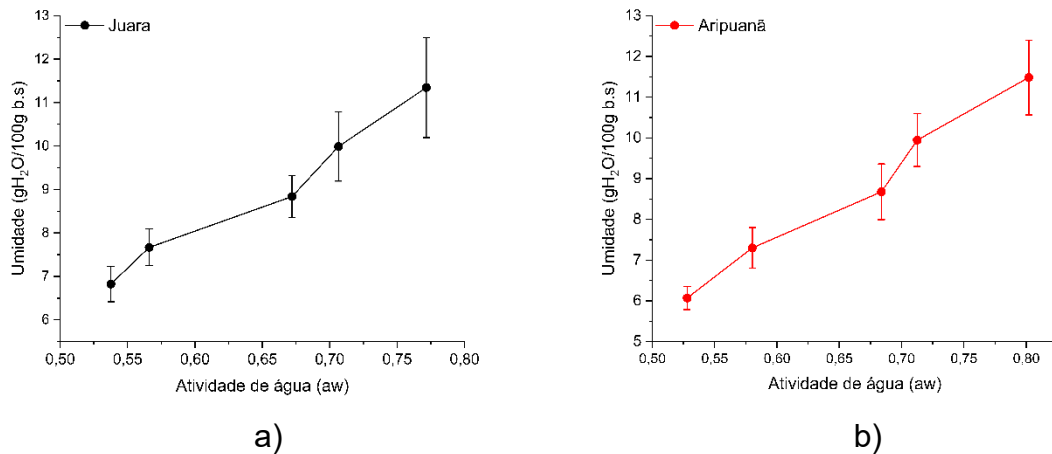


Figura 34. **Isotermas de adsorção experimentais a 25° C. a) Castanhas Juara, b) Castanhas Aripuanã.**

A partir do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foram obtidos os valores dos parâmetros analisados para verificação do grau de ajuste (Tabelas 19 e 20).

Tabela 19. **Parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais das castanhas-do-brasil do lote Juara submetidas a isoterma de dessecção a 25°C.**

Modelos	Parâmetros	SE	X ²	P	R ²
		decimal			(%)
BET	Xm= 2,85** C= 7,05ns	0,869	0,754	7,60	74,97
BET modificado	Xm= 4,55** C= 7,05ns K= 0,81**	0,286	0,082	2,58	97,49
GAB	Xm= 4,55** C= 8,70ns K= 0,81**	0,286	0,082	2,58	97,49
GAB modificado	Xm= 4,55** C= 8,70ns K= 0,81**	0,286	0,082	2,58	97,49

** Significativo a p= 0,01 pelo teste t; ^{ns}Não significativo pelo teste t.

Tabela 20. **Parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã submetidas a isoterma de dessorção a 25°C.**

Modelos	Parâmetros	SE	X ²	P	R ²
		decimal		(%)	
BET	Xm= 2,6**	1,123	1,261	10,61	70,04
	C= 4,1ns				
BET modificado	Xm= 3,56**	0,454	0,206	4,22	95,48
	C= 8,42ns				
	K= 0,87**				
GAB	Xm= 3,56**	0,454	0,206	4,22	95,48
	C= 9,05ns				
	K= 0,87**				

**Significativo a $p = 0,01$ pelo teste t; ^{ns}Não significativo pelo teste t.

Na isoterma de adsorção do lote Juara a 25 °C, o modelo BET apresentou significância estatística apenas para o parâmetro Xm (2,85**), enquanto o coeficiente C não foi significativo, o que pode estar relacionado à limitação do intervalo de atividade de água estudado (0,50-0,80). Segundo a literatura, o modelo BET é mais apropriado para representar regiões de baixa aw (geralmente até 0,5) (Mulet et al., 1999; Cassini et al., 2006; Thys et al., 2010), sendo menos robusto em maiores faixas de aw, o que compromete a estimativa precisa de parâmetros relacionados a energia de ligação da água na monocamada. Além disso, esse modelo apresentou o menor coeficiente de determinação ($R^2 = 74,97\%$) e os maiores valores de erro médio estimado ($SE = 0,869$) e qui-quadrado ($X^2 = 0,754$), indicando desempenho insatisfatório frente aos demais ajustes.

Já os modelos BET modificado, GAB e GAB modificado apresentaram resultados estatísticos idênticos entre si ($SE = 0,286$; $X^2 = 0,082$; $P = 2,58\%$; $R^2 = 97,49\%$), indicando excelente desempenho no ajuste da isoterma, segundo os critérios de Mohapatra & Rao (2005), que recomendam valores de P inferiores a 10 % para validação do modelo. Nesses três modelos, os parâmetros Xm (4,55**) e K (0,81**) foram estatisticamente significativos ao nível de 1%, com exceção do parâmetro C, que permaneceu sem significância estatística. A ausência de significância para C pode, novamente, estar

relacionada a restrição do intervalo de a_w analisado, que não contempla a região de monoadsorção de forma suficientemente ampla para que a constante de energia seja ajustada com precisão.

Dessa forma, os modelos BET modificado, GAB e GAB modificado demonstraram ajustes matemáticos equivalentes e satisfatórios para os dados experimentais de adsorção das castanhas Juara.

Na isoterma de adsorção do lote Aripuanã a 25 °C, o modelo BET apresentou significância estatística apenas para o parâmetro X_m (2,60**), enquanto o coeficiente C, relacionado à energia de ligação da água na monocamada, não foi estatisticamente significativo. Esse comportamento é coerente com o observado para o lote Juara. Além disso, esse modelo também apresentou o pior desempenho estatístico geral, com o maior erro médio estimado (SE = 1,123), maior qui-quadrado ($X^2 = 1,261$), menor coeficiente de determinação ($R^2 = 70,04\%$) e o único valor de P superior a 10 % (P = 10,61%).

Por outro lado, os modelos BET modificado e GAB apresentaram desempenho muito superior, com resultados estatísticos iguais (SE = 0,454; $X^2 = 0,206$; P = 4,22%) e mesmo coeficiente de determinação ($R^2 = 95,48\%$), reforçando a qualidade do ajuste. Em ambos os modelos, os parâmetros X_m (3,56**) e K (0,87**) foram significativos ao nível de 1 %, reforçando a confiabilidade dos coeficientes ajustados. Contudo, assim como no modelo BET, o coeficiente C permaneceu sem significância estatística, o que reforça que a faixa de a_w utilizada nos experimentos não foi suficiente para estimar com precisão a energia de ligação da água na monocamada.

Cabe destacar que, diferentemente do lote Juara, o modelo GAB modificado não apresentou convergência numérica durante o ajuste não linear dos dados experimentais deste lote, impossibilitando sua avaliação comparativa.

Na Figura 35, observa-se os pontos experimentais (média dos valores de umidade em função da a_w) das isotermas de adsorção das castanhas Juara e Aripuanã a 25 °C e respectivos ajustes no modelo GAB.

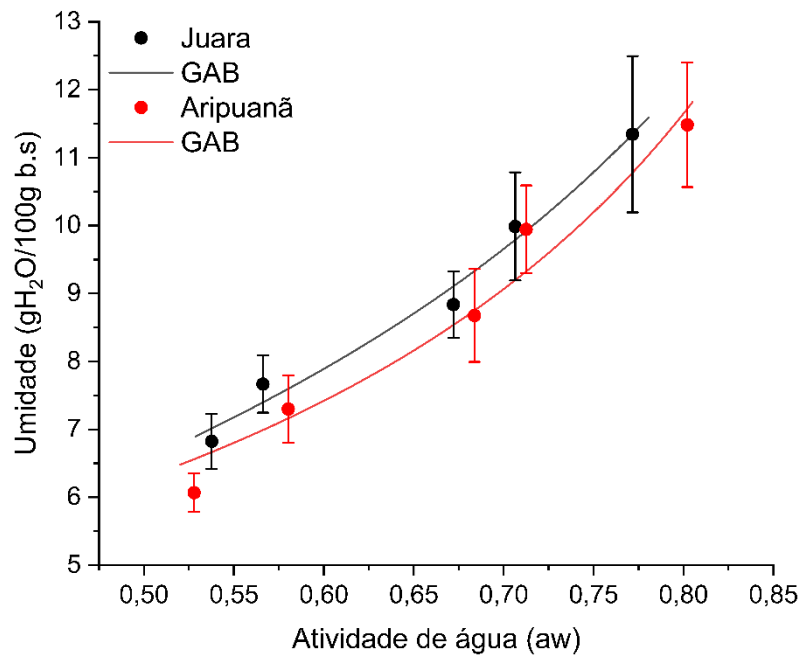


Figura 35. **Isotermas de adsorção a 25 °C dos castanhas dos lotes Juara e Aripuanã e respectivos ajustes matemáticos do modelo de GAB.**

A análise comparativa dos ajustes do modelo GAB às isotermas de adsorção a 25 °C revelou que as castanhas Juara apresentaram maior teor de umidade na monocamada ($X_m = 4,6 \pm 1,4$ g H₂O/100 g b.s.), em relação as castanhas Aripuanã ($X_m = 3,6 \pm 0,16$ g H₂O/100 g b.s) sugerindo maior capacidade de retenção de água na monocamada para Juara. Por outro lado, o parâmetro K foi ligeiramente maior em Aripuanã ($K = 0,87$) do que em Juara ($K = 0,81$). Esse resultado está em consonância com o observado na isoterma de dessorção a 60 °C, reforçando a tendência desse lote em apresentar maior capacidade relativa de retenção de água nas multicamadas.

Força de ruptura da casca das castanhas submetidas às isoterma de dessorção a 60 °C

A Figura 36 apresenta os resultados experimentais da força necessária para a ruptura da casca das castanhas-do-brasil dos lotes Juara e Aripuanã, submetidas às condições da isoterma de dessorção a 60 °C, em função da atividade de água (a_w) dos materiais.

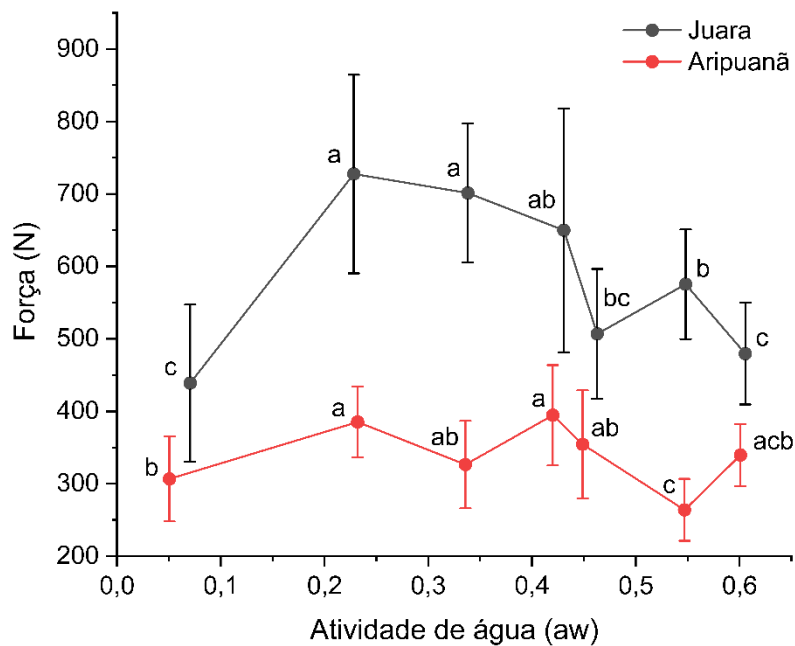


Figura 36. Força de ruptura da casca (em N) em função da atividade de água (a_w) nos lotes Juara e Aripuanã submetidos a isoterma de dessorção a 60 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo lote não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A força de ruptura da casca das castanhas-do-brasil do lote Juara variou significativamente em função da a_w , como evidenciado pela ANOVA ($F = 10,76$; $p < 0,0001$), com diferença estatística confirmada pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) entre diversos pares de tratamento.

A força média de ruptura variou de 439 N a um pico de 728 N, indicando diferença significativa. Este comportamento indica que a resistência mecânica da casca não foi linear em relação a a_w , atingindo um ponto máximo em condições intermediárias de umidade. As faixas de $a_w = 0,2282$ e $0,3382$ apresentaram as maiores forças ($728 \text{ N} \pm 137$ e $700 \text{ N} \pm 96$, respectivamente), enquanto os menores valores foram observados em $a_w = 0,0706$ e $0,6055$ ($439 \pm 108 \text{ N}$ e $479,55 \pm 70 \text{ N}$, respectivamente), evidenciando uma queda expressiva da resistência tanto em baixos quanto em altos teores de a_w . O ponto de máxima resistência situou-se, portanto, entre $a_w = 0,2282$ e $0,3382$, indicando neste intervalo, uma estrutura da casca coesa, sem amolecimento por excesso de água nem fragilidade por secagem extrema.

A interpretação desses dados à luz da isoterma de dessecção previamente obtida para o mesmo lote mostra que, à medida que o produto perde água (redução de a_w), a matriz fibrosa da casca sofre alterações estruturais relevantes. Em a_w muito baixa ($a_w = 0,0706$), a dessecção severa pode gerar microfissuras, tensões internas e consequente fragilidade, o que justifica a menor força observada. Já em a_w mais elevada ($a_w = 0,6055$), a maior mobilidade da água resulta em amolecimento do tecido, tornando-o menos resistente à compressão. Além disso, os desvios padrão mais elevados nas faixas intermediárias (como em $a_w = 0,4307$, onde a força de ruptura foi $650 \pm 168 \text{ N}$) sugerem uma heterogeneidade acentuada na estrutura física das castanhas. Em contraste, os menores desvios observados em a_w mais altas (como $460 \pm 70 \text{ N}$, em $a_w = 0,6055$) indicam comportamento mais uniforme, com menor resistência à ruptura.

Assim, os resultados apontam para uma relação parabólica invertida entre a_w e força de ruptura da casca, com impacto direto sobre o desempenho do descascamento. O conhecimento desse comportamento é crucial para definir estratégias de processamento que associem menor consumo de energia com maior rendimento e integridade da amêndoa.

A análise da força de ruptura da casca do lote Aripuanã revelou também que a resistência mecânica é sensivelmente influenciada pela a_w , com variações estatisticamente significativas entre os tratamentos (ANOVA: $F = 6,78$; $p < 0,05$). O teste de Tukey mostrou diferenças relevantes entre os níveis de a_w ($p < 0,05$), confirmando que a umidade do material e a disponibilidade de água interferiu diretamente na integridade estrutural da casca.

A maior força de ruptura foi observada em $a_w = 0,4200$ (395 ± 69 N), seguida de valores igualmente elevados em $a_w = 0,2320$ (385 ± 49 N), o que indica que estas faixas intermediárias de umidade favoreceram a rigidez da casca. Por outro lado, os menores valores foram encontrados nas extremidades da faixa higroscópica, como em $a_w = 0,5470$ (264 ± 43 N) e $a_w = 0,0506$ ($306,78 \pm 59$ N), o que sugere perda de resistência tanto em condições de secagem severa quanto em condições mais úmidas.

Outro ponto relevante é a menor variabilidade nas respostas do lote Aripuanã, evidenciada por desvios padrão mais homogêneos ao longo dos tratamentos. Isso sugere uma estrutura de casca capaz de distribuir melhor as tensões durante a compressão. Esse comportamento se torna ainda mais evidente ao se comparar com o lote Juara, que apresentou força média necessária para ruptura da casca sistematicamente maior em relação ao lote Aripuanã para todas as faixas de atividade de água avaliadas.

As diferenças percentuais variaram de 41,2% ($a_w \approx 0,60$) a 117,9% ($a_w \approx 0,55$), indicando que, em determinados pontos do processo de dessecção, a força exigida para romper a casca de Juara foi mais que o dobro da observada para Aripuanã. O maior contraste foi verificado em $a_w \approx 0,33$ (+114,8%) e $a_w \approx 0,55$ (+117,9%). Mesmo nas condições mais úmidas (a_w próximas de 0,60), nas quais ambas as amostras apresentaram redução da resistência, Juara manteve força média para ruptura cerca de 41% superior à de Aripuanã. Além de apresentar maior resistência global, o lote Juara exibiu desvios-padrão acentuadamente mais elevados, especialmente nas faixas de a_w mais baixas e intermediárias, evidenciando uma estrutura mais rígida e heterogênea frente à compressão. Essa maior variabilidade pode estar relacionada a diferenças estruturais externas e internas mais irregulares, que influenciam o comportamento mecânico durante a ruptura.

Ambos os lotes, no entanto, apresentaram padrões de comportamento semelhantes, com resistência máxima em faixas intermediárias de a_w , testadas e declínio nos extremos de umidade, indicando pontos críticos de equilíbrio hídrico para máxima rigidez da casca. Essa convergência reforça que a a_w influenciou o comportamento mecânico das castanhas-do-brasil submetidas ao processo de dessecção a 60 °C, mas também que as características físicas intrínsecas de cada lote, como formato, porosidade e massa, podem modular essa resposta.

Assim, enquanto as castanhas do lote Juara submetidas a isoterma de dessecção se destacaram pelas maiores forças médias, com comportamento mais rígido e variável, as castanhas do lote Aripuanã apresentaram resistência mais moderada. Tais características podem orientar diferentes estratégias de quebra e beneficiamento industrial, ressaltando a necessidade de ajustes por lote no processo de secagem e descascamento.

Força de ruptura da casca das castanhas submetidas às isotermas de adsorção a 25 °C

A Figura 37 apresenta os resultados experimentais da força necessária para a ruptura da casca das castanhas-do-brasil dos lotes Juara e Aripuanã, submetidas às condições da isoterma de adsorção a 25 °C, em função da atividade de água (a_w) dos materiais.

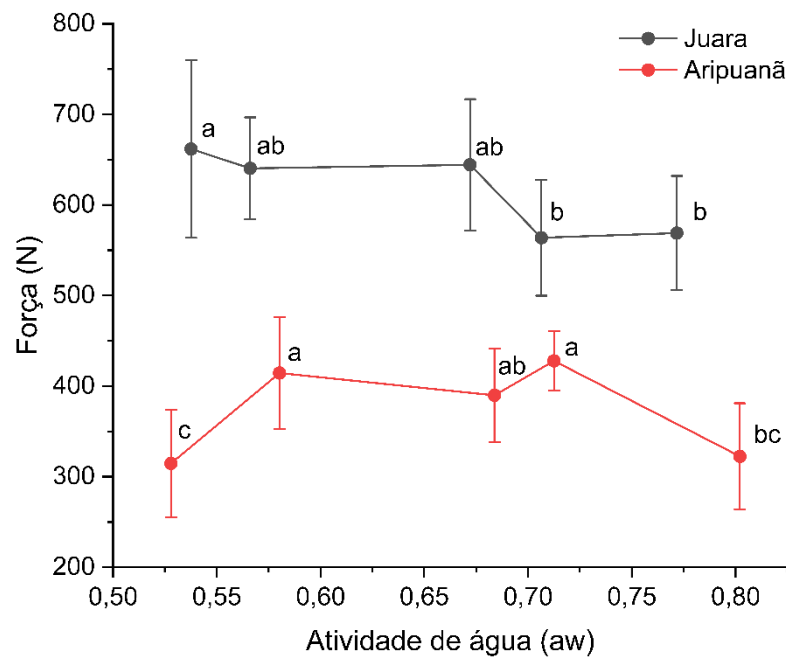


Figura 37. **Força de ruptura da casca (em N) em função da atividade de água (aw) nos lotes Juara e Aripuanã submetidos a isoterma de adsorção a 25 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo lote não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

A força de ruptura da casca das castanhas-do-brasil do lote Juara variou significativamente em função da aw, como demonstrado pela ANOVA ($F = 4,43$; $p = 0,0038 < 0,05$), com diferenças estatísticas entre pares confirmadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As médias de força de ruptura oscilaram entre 564 ± 64 N ($aw = 0,7065$) e 662 ± 98 N ($aw = 0,5377$). As castanhas nas faixas intermediárias do intervalo de aw testado ($aw = 0,5661$ e $0,6721$) apresentaram forças elevadas de ruptura (640 ± 56 N e 644 ± 73 N, respectivamente), sem diferença estatística significativa entre si ($p > 0,05$). Por outro lado, as castanhas da faixa de menor aw ($0,5377$) apresentaram força de ruptura estatisticamente superior àquelas com aw mais elevadas (662 ± 98), como em $aw = 0,7065$ ($p = 0,02$) e $aw = 0,7717$ ($p = 0,03$), sugerindo perda de resistência mecânica com o aumento da umidade.

Esse comportamento indica que a resistência da casca foi influenciada pelo teor de umidade, sendo maior nas castanhas nas faixas de a_w de 0,54-0,67 e menor nas expostas às condições mais úmidas (0,70 e 0,77). A redução da resistência nas castanhas com maior a_w pode ser atribuída ao amolecimento da matriz fibrosa pela plasticização da água, que compromete a coesão estrutural da casca.

A análise da força de ruptura da casca do lote Aripuanã evidenciou que a resistência mecânica foi significativamente influenciada pela a_w , conforme demonstrado pela ANOVA ($F = 10,37$; $p < 0,05$), com confirmação das diferenças estatísticas por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$).

A maior força de ruptura foi observada nas castanhas com $a_w = 0,7125$ (427 ± 33 N), seguidas pelas de $a_w = 0,5802$ (414 ± 62 N), ambas estatisticamente superiores aos grupos extremos. As castanhas com $a_w = 0,6838$ (390 ± 51 N) apresentaram resistência intermediária, estatisticamente iguais a ambos os extremos e nas faixas médias, conforme letras sobrescritas indicadas no teste de Tukey. Já os menores valores foram encontrados em $a_w = 0,5279$ (315 ± 59 N) e $a_w = 0,8021$ (322 ± 58 N), que formaram um mesmo grupo estatístico entre si, mas estatisticamente distintos das castanhas com maior resistência mecânica.

Esse comportamento indica que castanhas em faixas intermediárias de a_w do processo de adsorção de água tenderam a apresentar maior rigidez estrutural, enquanto valores extremos da faixa de a_w testada resultaram em menor resistência à ruptura da casca.

Um aspecto particularmente interessante foi observado na resposta mecânica da casca do lote Aripuanã: na isoterma de dessorção, a força de ruptura foi mínima na faixa de a_w em torno de 0,55, com posterior aumento da resistência em a_w ligeiramente superior (0,60-0,61). Esse comportamento não linear foi coerente com o padrão observado na isoterma de adsorção do mesmo lote, na qual também se identificou um ponto de inflexão próximo a $a_w = 0,55$, seguido de aumento na adsorção de água.

Ao comparar com o lote Juara, observa-se que, assim como nas castanhas avaliadas no processo de dessorção, o lote Aripuanã apresentou resistência globalmente inferior em todas as faixas de a_w avaliadas, com força

média necessária para ruptura variando de aproximadamente 31,7% ($a_w \approx 0,71$) a 110,4% ($a_w \approx 0,53$) inferior à observada em Juara.

A avaliação da força de ruptura sob diferentes condições higroscópicas é especialmente relevante considerando a prática usual no beneficiamento da castanha-do-brasil, onde as castanhas secas são submetidas à umidificação em autoclave (etapa de cozimento) antes do descascamento, a fim de reduzir a resistência da casca e facilitar sua quebra mecânica. Nessa perspectiva, os dados obtidos para o lote Aripuanã reforçam seu caráter estrutural mais plástico quando comparado ao lote Juara. Mesmo na faixa mais úmida ($a_w \approx 0,8$), Juara manteve vantagem considerável de resistência, com força média necessária para o rompimento aproximadamente 76% superior à observada para Aripuanã. Essa discrepância reforça a hipótese de que a casca de Aripuanã possui menor coesão estrutural, mesmo em condições de alta plasticidade induzida pela adsorção de umidade.

Assim, ainda que ambos os materiais apresentem redução da resistência com o aumento da a_w , a magnitude dessa resistência permanece substancialmente menor nas castanhas de Aripuanã. Este comportamento pode influenciar diretamente o desempenho das castanhas durante a quebra, tornando estas castanhas potencialmente mais suscetíveis à fragmentação da amêndoa durante o processamento, e exigindo, portanto, atenção diferenciada no manejo da etapa de cozimento e quebra.

Análise colorimétrica em função da atividade de água

Lotes Juara e Aripuanã submetidos a isoterma de dessorção a 60 °C

Casca

As figuras 38 e 39 apresentam os resultados dos parâmetros de cor da casca de castanhas dos lotes Juara e Aripuanã, respectivamente, submetidas à isoterma de dessorção a 60 °C.

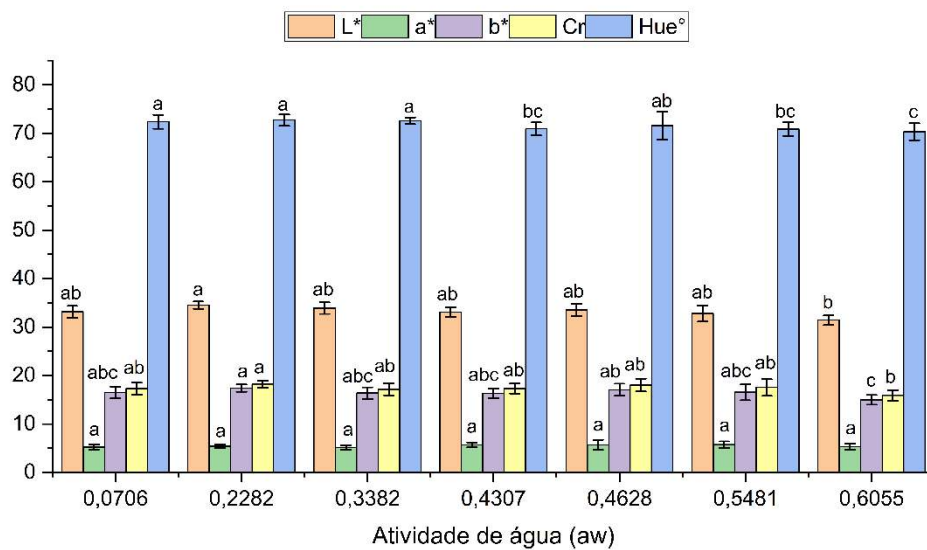


Figura 38. **Parâmetros de cor da casca de castanhas-do-brasil do lote Juara submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de dessorção a 60 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

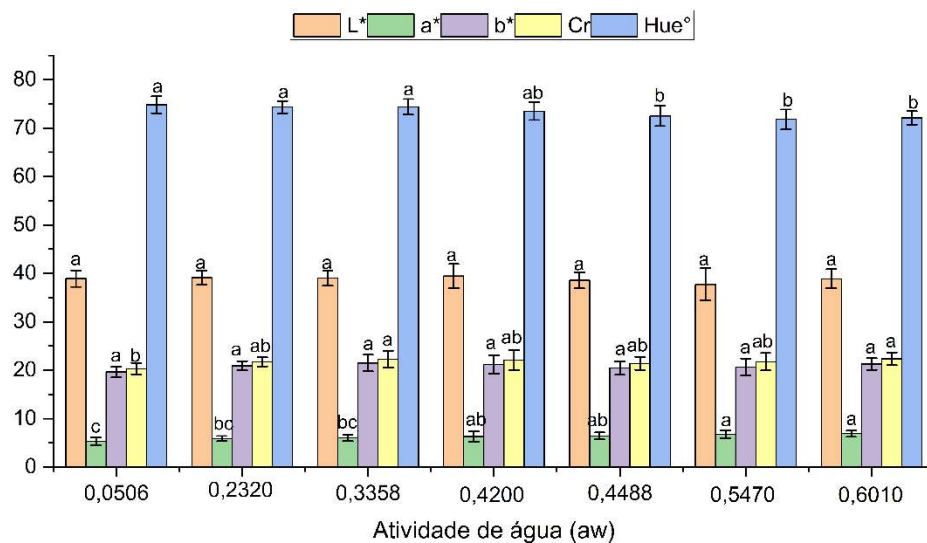


Figura 39. **Parâmetros de cor da casca de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de dessorção a 60 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

- **Coordenada L*:**

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo ($p < 0,05$) da atividade de água na luminosidade da casca de castanhas Juara, com F calculado superior ao F crítico ($6,23 > 2,22$). O teste de Tukey confirmou que castanhas com maior atividade de água ($aw = 0,6055$) apresentaram luminosidade significativamente inferior em comparação aos tratamentos com $aw = 0,2282, 0,3382, 0,4628, 0,0706$ e $0,4307$, evidenciando que a casca se tornou mais clara à medida que a atividade de água diminui durante o processo de dessorção.

A análise de variância (ANOVA) da coordenada L* da casca de castanhas do lote Aripuanã indicou que diferentes níveis de atividade de água não promoveram variações significativas ($p = 0,59$; $F = 0,7824 < F$ crítico = $2,22$). Os valores médios de luminosidade mantiveram-se relativamente

constantes, variando de 37,7 ($a_w = 0,5470$) a 39,4 ($a_w = 0,4200$). Assim, os resultados sugerem que a casca deste lote apresentou estabilidade visual em termos de luminosidade frente às variações de a_w , durante o processo de dessorção térmica.

- **Coordenada a^* :**

Na casca de castanhas do lote Juara, os valores de a^* variaram entre 5,14 e 5,73, indicando uma tonalidade levemente avermelhada. A análise de variância (ANOVA) da coordenada a^* da casca de castanhas Juara indicou que diferentes níveis de atividade de água (a_w) não promoveram variações significativas na coloração ao longo do eixo vermelho-esverdeado ($p = 0,12$; $F = 1,75 < F \text{ crítico} = 2,22$). Esses resultados sugerem que o componente de cor associado à tonalidade avermelhada ou esverdeada da casca não foi sensivelmente afetado pelas alterações no teor de umidade promovidas durante o processo de dessorção.

A análise de variância (ANOVA) da coordenada a^* da casca de castanhas do Lote Aripuanã indicou que diferentes níveis de atividade de água promoveram variações significativas na coloração ao longo do eixo vermelho-esverdeado ($p = < 0,05$; $F = 5,95 > F \text{ crítico} = 2,22$), com valores variando de 5,3 ($a_w = 0,0506$) até 6,9 ($a_w = 0,6010$). A partir do teste de Tukey, verificou-se que os menores valores médios de a^* foram observados nas menores atividades de água ($a_w = 0,0506$ a $0,3358$), enquanto os maiores valores foram encontrados nos tratamentos com $a_w = 0,547$ e $0,6010$, indicando um gradiente crescente de coloração avermelhada conforme o aumento da a_w .

- **Coordenada b^* :**

A análise de variância indicou que a atividade de água exerceu efeito significativo sobre a coordenada b^* da casca de castanhas-do-brasil do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 5,03 > F \text{ crítico} = 2,22$), demonstrando que os níveis de

umidade durante a dessecção influenciaram diretamente a coloração no eixo azul-amarelo, sendo que valores positivos indicam tonalidade amarela e valores negativos indicam tonalidade azulada. A amostra de castanhas com $a_w = 0,2282$ apresentou a maior média de b^* , o que indica uma tonalidade mais amarelada da casca sob menor teor de umidade. Em seguida, o grupo $a_w = 0,4628$ não diferiu significativamente da maior média, embora com leve redução na intensidade do amarelo. Os grupos $a_w = 0,0706$; $0,5481$; $0,3382$ e $0,4307$ compuseram um conjunto intermediário, sem diferença estatística entre si. Por fim, o grupo com $a_w = 0,6055$ obteve a menor média de b^* , o que sugere uma redução significativa na tonalidade amarela da casca sob maior atividade de água.

A análise de variância (ANOVA) da coordenada b^* da casca das castanhas do lote Aripuanã indicou que diferentes níveis de atividade de água (a_w) não promoveram variações estatisticamente significativas na coloração ao longo do eixo amarelo-azulado ($p = 0,052$; $F = 2,01 < F \text{ crítico} = 2,22$). Apesar do valor de p ligeiramente superior ao limite de significância, os resultados não permitem afirmar diferenças consistentes entre os tratamentos quanto à intensidade do amarelado da casca. Os valores médios de b^* variaram de 19,6 ($a_w = 0,0506$) a 21,5 ($a_w = 0,3358$), com oscilações sutis ao longo da isoterma de dessecção. Dessa forma, os dados sugerem que a coordenada b^* da casca deste lote apresenta moderada estabilidade visual frente às variações de a_w .

- **Croma (Cr):**

A análise de variância indicou que a a_w exerceu efeito significativo sobre os valores de Croma (Cr) da casca de castanhas-do-brasil do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 4,41 > F \text{ crítico} = 2,22$). Isso demonstra que diferentes níveis de umidade influenciaram a saturação da cor da casca durante o processo de dessecção. A amostra com $a_w = 0,2282$ apresentou o maior valor médio de Cr, o que indica maior intensidade ou pureza de cor em condições intermediárias de umidade. Por outro lado, o menor valor de Cr foi observado

em $a_w = 0,6055$, demonstrando redução significativa na saturação da cor em alta umidade. As demais amostras ($a_w = 0,0706$; $0,3382$; $0,4307$; $0,4628$ e $0,5481$) não diferiram significativamente entre si. Esses resultados sugerem que níveis extremos de umidade tenderam a reduzir a intensidade de cor da casca, enquanto níveis intermediários favoreceram maior saturação.

A análise de variância (ANOVA) da coordenada Croma (Cr) da casca de castanhas do lote Aripuanã indicou efeito significativo da atividade de água ($p < 0,05$; $F = 2,48 > F \text{ crítico} = 2,22$), evidenciando que diferentes níveis de umidade influenciaram a saturação da cor da casca ao longo da isoterma de dessecção a 60°C . O teste de Tukey identificou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. As amostras com $a_w = 0,3358$ e $0,6010$ apresentaram os maiores valores médios. Esses valores indicam maior saturação da cor nessas faixas de umidade. Por outro lado, a amostra com menor atividade de água ($a_w = 0,0506$) apresentou o menor valor médio, indicando redução na intensidade de cor sob condição extremamente seca. As demais amostras ($a_w = 0,2320$; $0,4200$; $0,4488$ e $0,5470$) não diferiram significativamente de nenhum dos extremos.

- **Ângulo Hue:**

A atividade de água exerceu influência estatisticamente significativa sobre o ângulo Hue da casca de castanhas-do-brasil do Lote Juara ($p < 0,05$; $F = 3,92 > F \text{ crítico} = 2,22$), conforme indicado pela ANOVA. O teste de Tukey demonstrou que a amostra com $a_w = 0,2282$, apresentou o maior valor médio de Hue, não diferindo significativamente das amostras com $a_w = 0,3382$ e $0,0706$. Por outro lado, a amostra com $a_w = 0,6055$, apresentou o menor valor do ângulo Hue, sendo estatisticamente diferente das demais. O comportamento colorimétrico reflete uma tendência de redução no valor do ângulo Hue com o aumento da umidade.

A análise de variância (ANOVA) do ângulo Hue da casca de castanhas do lote Aripuanã indicou efeito significativo da atividade de água ($p < 0,05$; $F = 5,89 > F \text{ crítico} = 2,22$), demonstrando que as variações nos níveis de

umidade influenciaram significativamente o matiz da coloração da casca durante o processo de dessecção a 60 °C. De acordo com o teste de Tukey, observou-se que os grupos com $a_w = 0,0506$, $0,2320$ e $0,3358$ apresentaram os maiores valores do ângulo Hue, não diferindo significativamente entre si. A amostra com $a_w = 0,4200$ também não diferiu estatisticamente desses três grupos. Por outro lado, as amostras com $a_w = 0,4488$, $0,5470$ e $0,6010$ apresentaram os menores valores do ângulo Hue.

Amêndoa

As figuras 40 e 41 apresentam os parâmetros de cor das amêndoas de castanhas dos lotes Juara e Aripuanã, respectivamente, submetidas à isoterma de dessecção a 60 °C.

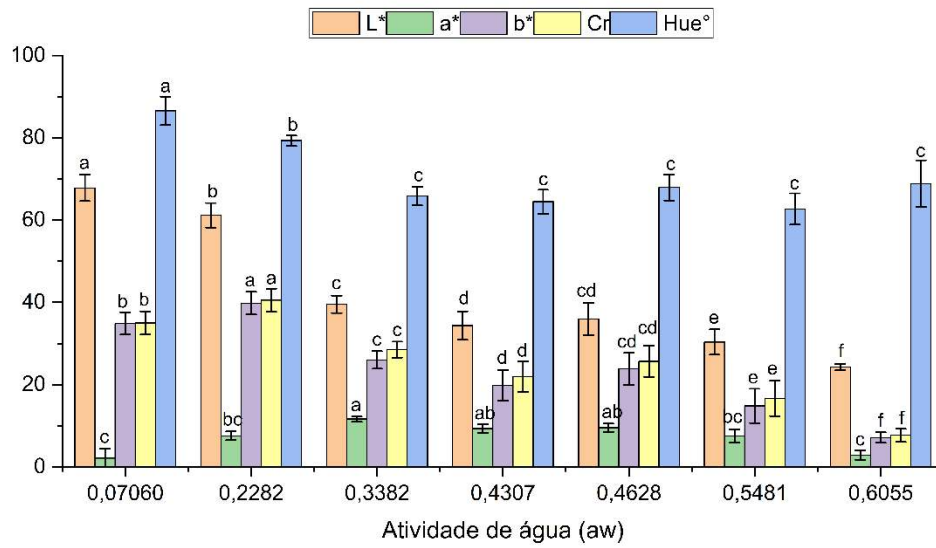


Figura 40. **Parâmetros de cor das amêndoas de castanhas-do-brasil do lote Juara submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de dessorção a 60 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

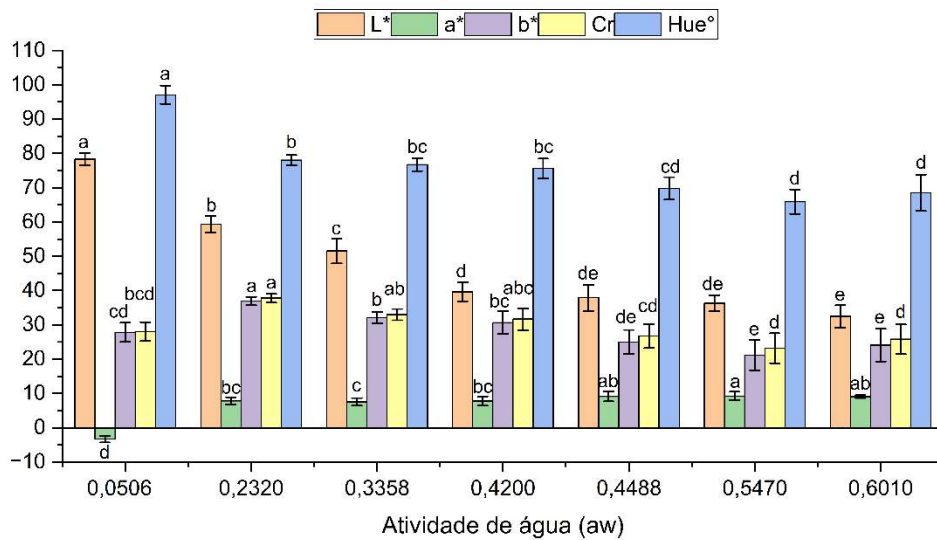


Figura 41. Parâmetros de cor das amêndoas de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de dessecção a 60 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

- **Coordenada L*:**

A análise de variância mostrou efeito altamente significativo da aw sobre a coordenada L* das amêndoas das castanhas Juara ($p < 0,05$; $F = 363,66 > F$ crítico = 2,22), indicando que a luminosidade foi fortemente influenciada pela variação no teor de umidade ao longo da dessecção. Observou-se aumento progressivo dos valores de L* à medida que a umidade foi reduzida, sugerindo que a amêndoa se apresentou mais clara em níveis de aw mais baixos. O teste de Tukey confirmou diferenças estatísticas entre os grupos. O grupo com menor aw (0,0706) apresentou o maior valor de L*, enquanto o grupo com maior aw (0,6055) apresentou o menor valor.

A aw exerceu efeito altamente significativo sobre a luminosidade (L*) das amêndoas das castanhas do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 372,54 > F$ crítico = 2,22). O maior valor médio de L* foi observado em aw = 0,0506, indicando

maior claridade das amostras submetidas a menor condição de aw. Em contrapartida, o menor valor foi registrado em aw = 0,6010, representando também uma significativa perda de luminosidade em maiores valores de aw.

- **Coordenada a*:**

A análise de variância indicou efeito significativo da atividade de água sobre a coordenada a* das amêndoas das castanhas do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 81,33 > F \text{ crítico} = 2,22$), revelando que a coloração avermelhada da fração amêndoa foi sensivelmente afetada ao longo da dessorção. Observou-se uma distribuição não linear dos valores de a* em função da aw: os maiores valores foram registrados em níveis intermediários de umidade, enquanto os extremos da curva com maior e menor aw (0,6055 e 0,0706, respectivamente) apresentaram os menores valores de a*. A amostra com aw = 0,3382, destacou-se com a maior média de a*, diferindo estatisticamente de todos os demais.

A análise de variância (ANOVA) da coordenada a* das amêndoas das castanhas do lote Aripuanã indicou efeito altamente significativo da aw ($p < 0,05$; $F = 191,22 > F \text{ crítico} = 2,22$), revelando que os diferentes níveis de umidade influenciaram a tonalidade avermelhada da fração interna da castanha. As médias dos valores de a* variaram de -3,29 a 9,29, indicando um amplo intervalo de coloração, desde tons esverdeados até avermelhados. O teste de Tukey revelou que a amostra com menor aw (0,0506) foi estatisticamente diferente de todos os demais, o que evidencia ausência de coloração avermelhada sob condição extremamente seca. Os maiores valores de a*, foram observados em aw = 0,4488, 0,5470, e 0,6010, indicando maior intensidade de vermelho em condições de umidade mais elevada.

- **Coordenada b*:**

A análise de variância revelou efeito altamente significativo da a_w sobre a coordenada b^* das amêndoas das castanhas-do-brasil do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 157,95 > F \text{ crítico} = 2,22$), indicando que a intensidade da tonalidade amarela foi sensivelmente alterada ao longo do processo de dessorção. Durante a perda de umidade, observou-se uma tendência clara de aumento progressivo nos valores de b^* , com os maiores valores encontrados nas amostras com menor a_w , especialmente em $a_w = 0,2282$, seguido do grupo de $a_w = 0,0706$, e menores valores nos grupos de $a_w = 0,5470$ e $0,6055$. O teste de Tukey confirmou essas diferenças, revelando que praticamente todos os tratamentos diferiram estatisticamente entre si.

A análise de variância demonstrou que a a_w exerceu efeito significativo sobre a coordenada b^* das amêndoas das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 31,43 > F \text{ crítico} = 2,22$). A maior média foi observada na amostra com $a_w = 0,2320$, que se destacou estatisticamente das demais, indicando uma coloração mais amarelada nesse ponto da isoterma de dessorção. A seguir, a amostra de $a_w = 0,3358$ também apresentou b^* elevado. A partir de $a_w = 0,4200$, iniciou-se uma tendência de queda nos valores de b^* , seguido por reduções mais expressivas nos valores de a_w mais elevados ($0,4488$, $0,6010$ e $0,5470$), indicando perda progressiva da tonalidade amarela da amêndoa em níveis mais altos de umidade. A amostra com $a_w = 0,0506$, apesar de estar entre as extremidades mais secas, apresentou média intermediária, sendo esta, estatisticamente inferior aos valores máximos, mas ainda distinta das condições de a_w mais altas.

- **Croma (Cr):**

A a_w exerceu efeito significativo sobre o Croma (Cr) das amêndoas das castanhas-do-brasil do lote Juara submetida à dessorção ($p < 0,05$; $F = 149,37 > F \text{ crítico} = 2,22$), demonstrando que a saturação da cor variou conforme os

níveis de umidade. A maior intensidade de cor foi observada nas amostras com $a_w = 0,2282$ seguida das amostras com $a_w = 0,0706$. Com o aumento da umidade, os valores de Cr reduziram progressivamente, com médias intermediárias nas amostras de $a_w = 0,3382$ a $0,4628$ e as menores intensidades em $a_w = 0,5481$ e $0,6055$. Esses resultados indicam que a saturação da cor reduziu com o aumento da umidade.

A atividade de água exerceu efeito significativo sobre Cr das amêndoas das castanha-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 29,31 > F$ crítico = $2,22$), revelando que a saturação da cor foi diretamente influenciada pelos níveis de umidade durante a dessorção. A maior intensidade de cor foi observada na amostra com $a_w = 0,2320$, refletindo coloração mais vívida nesta faixa. As amostras com $a_w = 0,3358$ e $0,4200$ não diferiram significativamente da maior média. O grupo com $a_w = 0,0506$ apresentou valor intermediário. As menores intensidades de cor foram observadas nas amostras com $a_w = 0,6010$, $0,4488$ e $0,5470$. Esses resultados confirmam a perda de saturação da cor da amêndoa em condições de maior umidade.

- **Ângulo Hue:**

A análise de variância demonstrou que a a_w influenciou significativamente o ângulo Hue das amêndoas das castanhas-do-brasil do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 77,83 > F$ crítico = $2,22$). O teste de Tukey revelou que a amostra com $a_w = 0,0706$ apresentou a maior média de ângulo Hue e foi estatisticamente superior a todas as demais, indicando uma tonalidade mais amarelada, possivelmente preservada pela menor disponibilidade de água, que reduz reações de degradação de pigmentos. A amostra com $a_w = 0,2282$ obteve a segunda maior média, diferindo estatisticamente das demais. As demais amostras, com a_w variando entre $0,3382$ e $0,6055$, apresentaram os menores valores do ângulo Hue, sendo estatisticamente iguais. Em resumo, o aumento da a_w promoveu uma redução significativa no ângulo Hue das amêndoas, revelando a sensibilidade da coloração das amêndoas às variações de umidade durante a dessorção.

A a_w exerceu efeito altamente significativo sobre o ângulo de matiz (ângulo Hue) das amêndoas das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 124,58 > F \text{ crítico} = 2,22$), evidenciando que os diferentes níveis de umidade durante a dessorção impactaram diretamente a tonalidade da cor percebida. A amostra com menor a_w (0,0506) apresentou o maior valor do ângulo Hue. Essa tonalidade mais elevada indica uma coloração perceptivelmente mais deslocada para tons amarelados-esverdeados. As menores médias do ângulo Hue foram observadas nos grupos com maiores valores de a_w (0,4488, 0,6010, e 0,5470). Esses valores mais baixos indicam tonalidades deslocadas para tons menos amarelados e mais avermelhados-esverdeados. De maneira geral, observa-se uma tendência decrescente dos valores do ângulo Hue com o aumento da a_w , sugerindo que a umidade pode estar associada a uma mudança na direção da cor das amêndoas.

Película

As figuras 42 e 43 apresentam os parâmetros de cor da película de amêndoas das castanhas dos lotes Juara e Aripuanã, respectivamente, submetidas à isoterma de dessorção a 60 °C.

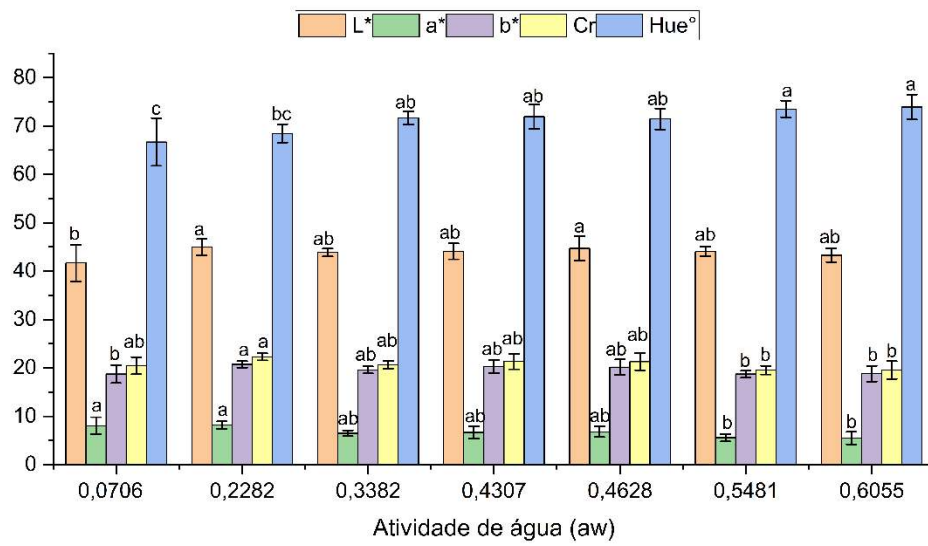


Figura 42. **Parâmetros de cor da película de amêndoas das castanhas do lote Juara submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de dessecção a 60 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

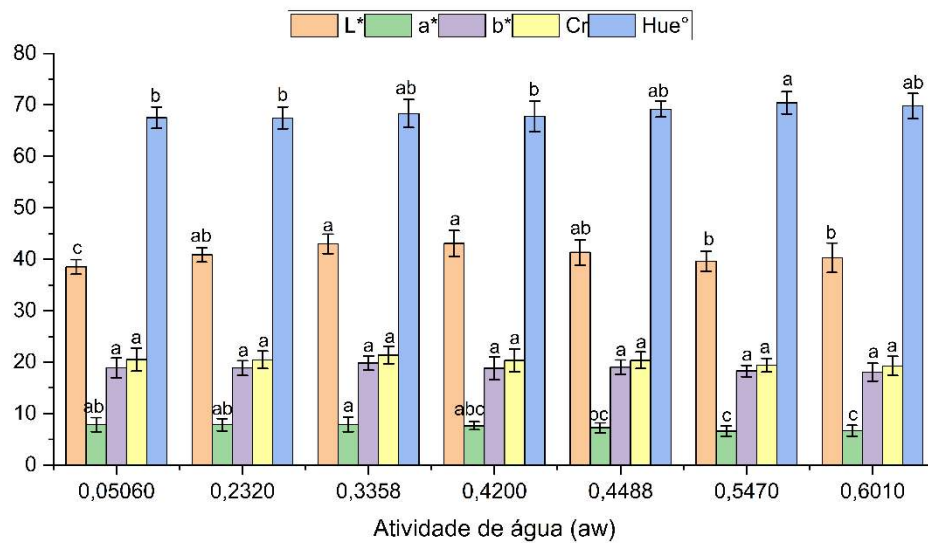


Figura 43. **Parâmetros de cor da película de amêndoas das castanhas do lote Aripuanã submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de dessecção a 60 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

- **Coordenada L*:**

A análise de variância (ANOVA) indicou que a aw influenciou significativamente a luminosidade (L*) da película de amêndoas Juara ($p < 0,05$; $F = 3,32 > F$ crítico = 2,22). Os valores médios de L* variaram entre 41,67 (aw = 0,0706) e 44,95 (aw = 0,2282). O teste de Tukey identificou diferenças estatisticamente significativas entre a amostra mais seca (aw = 0,0706), que apresentou menor luminosidade, e as amostras com aw = 0,2282 e 0,4628. As demais amostras não diferiram significativamente da amostra mais seca, refletindo um padrão intermediário. Esses resultados sugerem que a luminosidade da película da amêndoa Juara tende a diminuir sob aw muito baixa, mas se mantém relativamente estável nas demais faixas.

Com base na ANOVA ($p < 0,05$; $F = 7,35 > F$ crítico = 2,22), a aw também influenciou significativamente a luminosidade (L*) da película de

amêndoas da castanha-do-brasil do lote Aripuanã, evidenciando que variações no teor de umidade impactaram a claridade da fração. De acordo com o teste de Tukey, os maiores valores de L^* foram observados nas amostras com $a_w = 0,4200$ e $0,3358$, refletindo coloração mais clara nessas faixas de a_w intermediária. Já o menor valor de L^* da película foi registrado nas castanhas com $a_w = 0,0506$, significativamente inferior às outras amostras. Esses resultados indicam que a película da amêndoa tende a apresentar coloração mais clara em condições de umidade intermediária, enquanto tanto a umidade extremamente baixa quanto a elevada podem estar associadas a escurecimento da fração (redução dos valores de L^*).

- **Coordenada a^* :**

A a_w influenciou significativamente a coordenada a^* da película da amêndoa Juara ($p < 0,05$; $F = 10,65 > F$ crítico = 2,22), indicando variações na tonalidade avermelhada da superfície. Os maiores valores médios de a^* foram observados nas menores a_w (0,2282 e 0,0706), estatisticamente semelhantes entre si, sugerindo coloração vermelha mais intensa em condições secas. Em contrapartida, os menores valores de a^* foram registrados nos grupos com $a_w = 0,5481$ e $0,6055$, refletindo menor intensidade de vermelho sob maiores valores de a_w . As amostras submetidas às condições intermediárias de a_w (0,3382, 0,4307 e 0,4628), não diferiram estatisticamente entre si. Esse gradiente sugere uma diminuição progressiva da coloração avermelhada com o aumento da a_w .

A a_w também exerceu efeito significativo sobre a coordenada a^* da película da amêndoa Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 3,03 > F$ crítico = 2,22), evidenciando que a intensidade da coloração avermelhada foi afetada pelos níveis de umidade durante a dessorção. A média mais elevada foi observada na amostra com $a_w = 0,3358$, indicando maior saturação na tonalidade avermelhada. Por outro lado, as menores médias foram observadas nas amostras com $a_w = 0,4488$, $0,5470$ e $0,6010$, refletindo menor contribuição do componente vermelho nestas condições. Esse padrão sugere uma diminuição

progressiva da intensidade da coloração avermelhada com o aumento da disponibilidade de água.

- **Coordenada b*:**

Com base na análise de variância (ANOVA) para a coordenada b* da película de amêndoas da castanha-do-brasil do lote Aripuanã, a aw exerceu influência estatisticamente significativa sobre a tonalidade amarela da amostra ($p < 0,05$; $F = 4,93 > F \text{ crítico} = 2,22$), indicando que variações no teor de umidade impactaram a coloração da película ao longo da isoterma de dessecção. De acordo com o teste de Tukey, a amostra com $aw = 0,2282$ apresentou o maior valor médio de b*, indicando a maior intensidade de coloração amarela da película sob condição intermediária de umidade. Estas amostras diferiram estatisticamente das com $aw = 0,0706$, $0,5481$ e $0,6055$, que apresentaram os menores valores médios de b* e não diferiram entre si. Já as amostras com $aw = 0,3382$, $0,4307$ e $0,4628$ apresentaram valores médios intermediários, sem diferença significativa em relação aos demais, compondo um grupo de transição. Esses resultados indicam que a tonalidade amarela da película da amêndoa tende a ser menos intensa (b* reduzido) tanto sob condições de baixa quanto de alta aw.

A análise de variância (ANOVA) da coordenada b* da película da amêndoa das castanhas do lote Aripuanã indicou que os diferentes níveis de aw não promoveram variações significativas ($p = 0,21$; $F = 1,44 < F \text{ crítico} = 2,22$). A coordenada b*, apresentou valores médios que variaram de 18,06 ($aw = 0,601$) a 19,84 ($aw = 0,3358$). Esses resultados indicam que, mesmo diante da exposição das amostras à isoterma de dessecção a 60 °C em diferentes faixas de umidade, a coloração amarela da película manteve-se relativamente estável, demonstrando baixa sensibilidade do parâmetro de cor b* às variações de aw.

- **Croma (Cr):**

A análise de variância indicou efeito significativo da a_w sobre o Cr ($p < 0,05$; $F = 5,83 > F$ crítico = 2,22), indicando que os diferentes níveis de umidade influenciaram a saturação da cor da película de amêndoas do lote Juara. O teste de Tukey identificou que a amostra com $a_w = 0,2282$ apresentou a maior saturação de cor (22,28), e significativamente diferente das amostras com os menores valores de Cr ($a_w = 0,5481$ e $0,6055$). As demais amostras ($a_w = 0,0706$; $0,3382$; $0,4307$; $0,4628$) apresentaram valores intermediários e não diferiram significativamente nem dos maiores nem dos menores valores. Esses dados sugerem que a saturação da cor da película é mais intensa em níveis intermediários de a_w (especialmente em $a_w = 0,2282$), reduzindo-se significativamente em altos valores de a_w .

A análise de variância (ANOVA) do Cr da película de amêndoas do lote Aripuanã revelou que os diferentes níveis a_w não promoveram variações estatisticamente significativas ($p = 0,11$; $F = 1,81 < F$ crítico = 2,22). O Cr variou entre 19,26 ($a_w = 0,601$) e 21,38 ($a_w = 0,3358$), indicando alterações discretas ao longo do gradiente de umidade. Apesar da exposição das amostras à isoterma de dessecção a 60°C , os resultados sugerem que a intensidade da coloração da película manteve-se relativamente constante, demonstrando estabilidade visual frente às variações de a_w no intervalo analisado.

- **Ângulo Hue:**

O ângulo Hue (h°), indicativa do matiz da cor, apresentou variação significativa com a a_w ($p < 0,05$; $F = 11,49 > F$ crítico = 2,22) na película de amêndoas do lote Juara. O teste de Tukey identificou que as amostras com maior a_w ($0,5481$ e $0,6055$) apresentaram os maiores valores médios do ângulo Hue, ou seja, foram significativamente diferentes das amostras com menor valor de a_w ($0,0706$). Isso sugere uma mudança no matiz da cor da

película com o aumento da umidade, possivelmente indicando degradação de pigmentos ou outras alterações estruturais que afetam a reflexão da luz. As amostras em condições intermediárias de a_w (0,3382, 0,4307 e 0,4628) apresentaram valores do ângulo Hue estatisticamente semelhantes entre si e às amostras com $a_w = 0,2282$, a qual se posicionam como uma transição entre os menores e maiores valores do ângulo.

A análise de variância (ANOVA) do ângulo Hue da película da amêndoa das castanhas do lote Aripuanã indicou que os diferentes níveis de a_w promoveram variações estatisticamente significativas na tonalidade da coloração ($p < 0,05$; $F = 2,77 > F$ crítico = 2,22). O ângulo Hue, variou de $67,49^\circ$ ($a_w = 0,232$) a $70,21^\circ$ ($a_w = 0,547$), revelando que o teor de a_w influenciou diretamente a percepção visual da cor da película ao longo do processo de dessorção térmica a 60°C . De acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$), a amostra com $a_w = 0,547$ apresentou valor significativamente superior do ângulo Hue quando comparado às amostras com $a_w = 0,0506$ e $0,2320$. Esse aumento no ângulo Hue pode indicar uma alteração na tonalidade da cor da película, com tendência de deslocamento para matizes mais amarelados ou esverdeados à medida que a umidade aumenta.

Análise comparativa da cor das castanhas Juara e Aripuanã submetidas às isotermas de dessorção a 60°C

A análise comparativa entre os lotes Juara e Aripuanã revela comportamentos distintos nas propriedades colorimétricas da castanha-do-brasil submetida à dessorção a 60°C sob diferentes condições de a_w . Na casca, a luminosidade (L^*) manteve-se estável em Aripuanã ($p > 0,05$), enquanto Juara apresentou redução significativa apenas nas a_w mais elevadas, evidenciando escurecimento sob maior teor de umidade. A coordenada a^* aumentou significativamente em Aripuanã, indicando intensificação avermelhada com o aumento da a_w , ao passo que permaneceu estável em Juara. A coordenada b^* variou significativamente apenas em Juara, com máximos em a_w mais reduzida. O Cromo apresentou diferenças

significativas em ambos os lotes: em Juara, acompanhou o padrão de b^* , em Aripuanã, não teve comportamento linear, com aumento da saturação em a_w de água mais baixa e mais alta. O ângulo de matiz (Hue) reduziu em a_w elevadas em ambos os lotes, com efeito mais pronunciado em Aripuanã.

Na amêndoa, ambos os lotes apresentaram redução significativa da luminosidade (L^*) com o aumento da a_w , sendo a queda mais acentuada em Juara nas a_w mais elevadas. A coordenada a^* variou significativamente nos dois lotes, mas com padrões distintos: em Juara, os maiores valores foram registrados em condições intermediárias de umidade, com redução tanto em a_w muito baixas quanto muito altas; em Aripuanã, observou-se aumento expressivo em condições úmidas, partindo de valores negativos (esverdeados) sob condição extremamente seca para máximos avermelhados em faixas mais úmidas. A coordenada b^* também apresentou comportamento diferenciado: em Juara, houve tendência de aumento progressivo da tonalidade amarela à medida que a umidade diminuiu, atingindo valores máximos nas condições mais secas; em Aripuanã, a coloração amarelada foi mais intensa em faixas intermediárias de umidade, com redução gradual em condições mais úmidas. O Croma acompanhou esses padrões: em Juara, a saturação da cor foi maior nas condições mais secas, reduzindo com o aumento da umidade; em Aripuanã, a saturação foi máxima em faixas intermediárias, diminuindo em níveis mais altos de a_w . O Hue reduziu em ambos em maiores a_w , evidenciando deslocamento da tonalidade para regiões mais avermelhadas com o aumento da umidade.

Na película, a luminosidade (L^*) apresentou comportamento dependente da faixa de umidade em ambos os lotes. Em Juara, valores mais baixos foram observados em condição extremamente seca, enquanto as condições intermediárias de umidade mantiveram luminosidade ligeiramente mais elevada, mas sem diferenças marcantes entre a maioria dos pontos. De maneira similar, em Aripuanã, a claridade também foi máxima em níveis intermediários de umidade e menor sob condição muito seca, com redução nos extremos, indicando que tanto a baixa quanto a alta a_w tendem a reduzir o brilho superficial. A coordenada a^* variou significativamente em ambos os lotes, mas de forma distinta: em Juara, os maiores valores ocorreram em

condições secas, com redução progressiva à medida que a umidade aumentou; em Aripuanã, observou-se maior intensidade avermelhada em nível intermediário de umidade, seguida de queda também em a_w mais elevadas. O comportamento da coordenada b^* também diferiu entre os lotes. Em Juara, houve variação significativa, com maior intensidade amarela em condição intermediária e valores menores tanto em baixa quanto em alta umidade. Em Aripuanã, o parâmetro se manteve estável ao longo das faixas de a_w sem diferenças significativas. O Cromo acompanhou esse padrão: em Juara, a saturação foi maior em faixa intermediária de umidade e reduziu em condições de alta a_w ; em Aripuanã, manteve-se estável, sem diferenças estatisticamente relevantes. O Hue variou significativamente nos dois lotes, apresentando tendência de aumento em condições de maior umidade, o que sugere um leve deslocamento da tonalidade para matizes mais amarelados ou esverdeados.

A análise revela que as alterações cromáticas durante a dessecção são dependentes da fração e do lote. Na casca, Aripuanã foi mais sensível à intensificação avermelhada, enquanto Juara apresentou maior variação na intensidade amarela e saturação. Na amêndoa, as alterações foram mais expressivas em Juara, sobretudo para L^* e a^* . Na película, as diferenças significativas concentraram-se em Juara, reforçando que este lote apresentou resposta cromática mais pronunciada na perda de umidade.

De modo geral, a amêndoa foi a fração mais sensível às variações de a_w , com alterações mais intensas em todos os parâmetros colorimétricos (Figura 44 e 45). Esse resultado merece destaque uma vez que a amêndoa é a fração de maior interesse comercial, sendo que sua aceitação é afetada pela aparência visual, tanto de formato quanto de coloração.



Figura 44. a) Amêndoa Juara de castanha com $a_w = 0,0706$ em isoterma de dessecção à $60\text{ }^\circ\text{C}$, b) Amêndoa Juara de castanha com $a_w = 0,6055$ em isoterma de dessecção à $60\text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 45. a) Amêndoa Aripuanã de castanha com $a_w = 0,0506$ em isoterma de dessecção à $60\text{ }^\circ\text{C}$, b) Amêndoa Aripuanã de castanha com $a_w = 0,6010$ em isoterma de dessecção à $60\text{ }^\circ\text{C}$.

A análise conjunta dos dados colorimétricos dos lotes Juara e Aripuanã à luz do modelo de Labuza (1975) (Figura 46) permite uma compreensão aprofundada da influência da atividade de água (a_w) sobre a estabilidade visual das frações da castanha-do-brasil durante a dessecção a $60\text{ }^\circ\text{C}$.

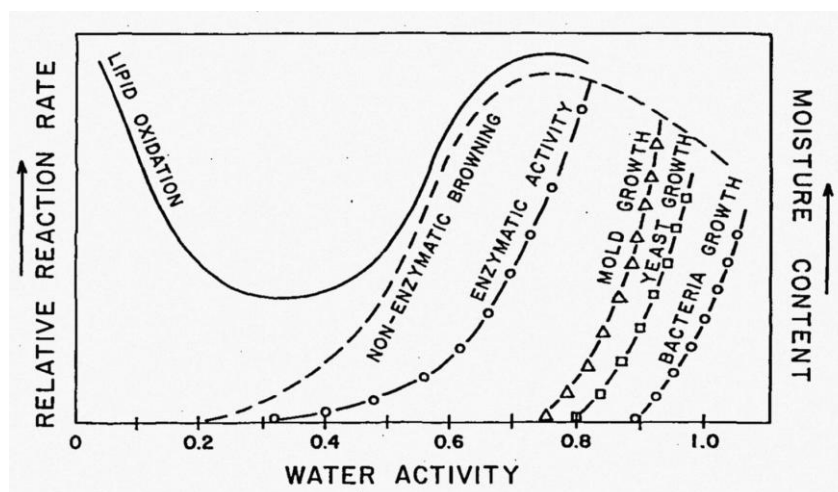


Figura 46. **Relação entre a atividade de água e velocidade relativa das reações de deterioração em alimentos. Fonte: Labuza (1975).**

Em ambos os lotes, o comportamento dos parâmetros L^* , a^* , b^* , Cr e ângulo Hue segue tendências compatíveis com o modelo teórico, evidenciando que a coloração das frações é fortemente afetada pelas variações de a_w , com padrões similares nas faixas extremas e intermediárias de a_w .

Nas faixas de a_w mais baixas ($a_w \leq 0,2282$ no lote Juara e $a_w \leq 0,232$ no Aripuanã), tanto Juara quanto Aripuanã apresentaram elevada preservação da coloração original, especialmente nas amêndoas, que exibiram altos valores de L^* , b^* , Cr e ângulo Hue. Essa manutenção da aparência visual se explica pela baixa taxa relativa de reações deteriorativas nessas condições, conforme proposto por Labuza (1975). A a_w insuficiente para permitir mobilidade molecular impede reações de escurecimento não enzimático e enzimático, preservando a integridade dos pigmentos estruturais. Nas castanhas de Aripuanã, a amêndoa com $a_w = 0,0506$ apresentou $L^* = 78,29$ e ângulo Hue = $97,09^\circ$, revelando uma tonalidade clara e esverdeada, enquanto as castanhas do lote Juara, com valores similares, confirmaram esse comportamento de estabilidade.

Na faixa intermediária de a_w (de aproximadamente 0,33 a 0,46), os dois lotes apresentaram sinais claros de início de alterações visuais, sobretudo na amêndoa e na película. O lote Juara revelou queda em L^* , b^* e Cr nessa faixa, com escurecimento progressivo e perda de saturação, compatível com o aumento da taxa das reações químicas descritas por Labuza (1975). As castanhas do lote Aripuanã seguiram padrão semelhante, com redução na luminosidade da amêndoa (L^* reduzindo de 78,29 para 39,6 entre $a_w = 0,0506$ e 0,420), elevação da coordenada a^* (indicando coloração mais avermelhada), e início da queda do ângulo Hue, caracterizando mudanças cromáticas mais intensas. Esse estágio representa o ponto de transição na curva de Labuza, onde a maior mobilidade hídrica favorece as reações e atividade enzimática, especialmente em frações ricas em compostos oxidáveis (lipídios) como a amêndoa.

Nas faixas de a_w mais elevadas ($a_w \geq 0,5481$ em Juara e $a_w \geq 0,5470$ em Aripuanã), observou-se intensificação dos processos de escurecimento em ambas as amostras. A amêndoa de Aripuanã, por exemplo, teve a coordenada $L^* = 32,49$ em $a_w = 0,6010$, uma redução de cerca de 58% comparada com as amêndoas expostas a menor atividade de água, além disso a coordenada b^* e ângulo Hue também foram reduzidos, indicando perda da luminosidade e formação de tons mais escuros e avermelhados, como observado na figura 45. O comportamento é compatível com a região da curva apresentada por Labuza (1975) em que as reações de escurecimento não enzimático atingem seu ápice e a atividade enzimática se mantém elevada. Nas amêndoas do lote Juara, a degradação foi igualmente evidente (figura 44), embora as mudanças na película e casca tenham sido mais moderadas. Em ambas as amostras, a casca manteve-se como a fração mais estável, com variações discretas nos parâmetros de cor, o que pode ser atribuído à sua estrutura mais resistente e à menor sensibilidade à oxidação.

Em síntese, os resultados dos dois lotes corroboram as previsões do modelo proposto por Labuza (1975): a manutenção da qualidade visual é favorecida em baixos valores de a_w , enquanto a degradação se intensifica nas faixas intermediárias e altas, com ênfase na amêndoa como fração mais suscetível. As diferenças entre os lotes ressaltam a importância do controle da umidade e a_w para preservar as propriedades, bem como a necessidade

de considerar variabilidades intrínsecas entre origens distintas da castanha-do-brasil.

Lote Juara e Aripuanã submetidos a isoterma de adsorção a 25 °C

Casca

As figuras 47 e 48 apresentam os parâmetros de cor da casca das castanhas dos lotes Juara e Aripuanã, respectivamente, submetidas à isoterma de adsorção a 25 °C.

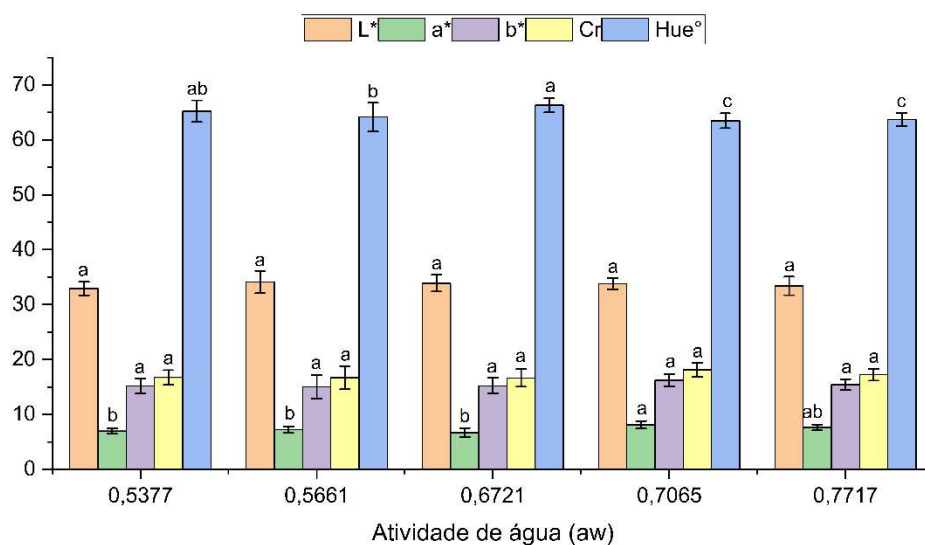


Figura 47. Parâmetros de cor da casca de castanhas-do-brasil do lote Juara submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de adsorção a 25°C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

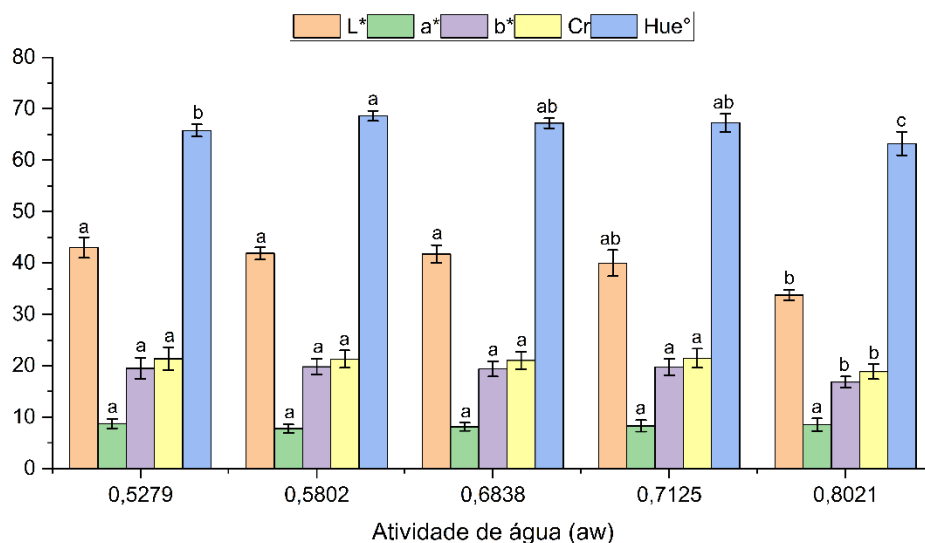


Figura 48. Parâmetros de cor da casca de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de adsorção a 25°C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

- **Coordenada L*:**

A análise de variância (ANOVA) indicou ausência de efeito significativo da atividade de água sobre a luminosidade (coordenada L*) da casca de castanhas-do-brasil do lote Juara submetida à adsorção a 25 °C ($p = 0,36$; $F = 1,11 < F \text{ crítico} = 2,54$), indicando luminosidade estatisticamente semelhante em todas as faixas de aw avaliadas.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da aw na coordenada L* da casca de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 51,56 > F \text{ crítico} = 2,54$). O teste de Tukey revelou que a amostra com maior aw (0,8021) apresentou valor de L* significativamente inferior em comparação as amostras de aw = 0,5279, 0,5802 e 0,6838, evidenciando escurecimento da casca nesse ponto mais úmido da dessorção. O grupo com aw = 0,7125 apresentou valor intermediário, sem diferença significativa em relação aos

grupos com a_w menores, mas estatisticamente distinto do grupo mais úmido ($a_w = 0,8021$).

- **Coordenada a^* :**

A análise de variância (ANOVA) indicou que a a_w influenciou significativamente os valores da coordenada a^* da casca das castanhas do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 9,11 > F \text{ crítico} = 2,54$). O teste de Tukey evidenciou que castanhas com $a_w = 0,7065$ apresentaram coloração significativamente mais avermelhada (valor da coordenada a^* mais elevada) do que as amostras com $a_w = 0,5377$, $0,5661$ e $0,6721$. Já a amostra com $a_w = 0,7717$ obteve valor intermediário, sem diferir de forma estatisticamente significativa nem da amostra com a_w mais elevada ($a_w = 0,7065$), nem das demais. Esses resultados indicam que a coloração avermelhada da casca do lote Juara tendeu a intensificar-se com o aumento da a_w , especialmente a partir de $a_w = 0,7065$.

A coordenada a^* da casca de castanhas do lote Aripuanã variou de 7,78 a 8,77 durante o processo de adsorção a 25 °C. No entanto, a análise de variância (ANOVA) não indicou efeito significativo da a_w sobre os valores da coordenada a^* da casca de castanhas do lote Aripuanã ($p = 0,16$; $F = 1,70 < F \text{ crítico} = 2,54$), indicando que a variação da a_w durante a adsorção não influenciou significativamente a componente de cor a^* .

- **Coordenada b^* :**

A coordenada b^* da casca de castanhas do lote Juara variou de 15,05 a 16,23 durante a adsorção, refletindo uma coloração amarela relativamente constante nos diferentes valores de a_w avaliados. No entanto, a análise de variância (ANOVA) não indicou diferença significativa entre as amostras ($p =$

0,30; $F = 1,25 < F \text{ crítico} = 2,54$), o que demonstra que a aw não teve efeito significativo sobre o a coordenada b^* na coloração da casca neste lote.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da aw na coordenada b^* da casca de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 7,61 > F \text{ crítico} = 2,54$). O teste de Tukey revelou que a amostra com aw mais elevada (aw = 0,8021) apresentou o menor valor de b^* , ou seja, redução da tonalidade amarela, diferindo significativamente das demais amostras, as quais apresentaram médias mais elevadas e estatisticamente semelhantes entre si.

- **Parâmetro Croma (Cr):**

A análise de variância (ANOVA) indicou que não houve efeito significativo da aw sobre o parâmetro Cr da casca de castanhas-do-brasil do lote Juara ($p = 0,09$; $F = 2,12 < F \text{ crítico} = 2,54$). Esse resultado revela que as variações na aw, no intervalo analisado, não foram capazes de promover alterações estatisticamente significativas na intensidade de cor da casca, expressa pelo parâmetro Cr, durante o processo de dessecamento.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da aw no parâmetro Cr da casca de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 4,50 > F \text{ crítico} = 2,54$). O teste de Tukey revelou que a amostra com maior aw (0,8021) apresentou valor médio de Cr significativamente menor em relação às demais amostras, indicando uma perda de intensidade da cor da casca.

- **Ângulo Hue:**

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da aw sobre o ângulo Hue da casca da castanhas-do-brasil do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 5,31 > F \text{ crítico} = 2,54$). O teste de Tukey revelou que as amostras com aw =

0,7065 e 0,7717 apresentaram os menores valores do ângulo Hue, estatisticamente diferentes do da amostra com $a_w = 0,6721$, que apresentou o maior valor. As amostras com $a_w = 0,5377$ e $0,5661$ apresentaram valores intermediários. Assim, a redução significativa do ângulo Hue em maiores valores de a_w sugere uma mudança no matiz da cor da casca, com maior predominância de tons quentes (amarelado-avermelhado) nas a_w mais elevadas.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da a_w sobre o ângulo Hue da casca de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 21,30 > F$ crítico = 2,54), evidenciando que mudanças na a_w ao longo do processo de adsorção influenciaram a tonalidade da cor da casca. O teste de Tukey demonstrou diferenças estatisticamente significativas entre as amostras. O maior valor do ângulo Hue foi observado na amostra com $a_w = 0,5802$, seguida por valores ligeiramente menores em $a_w = 0,7125$ e $0,6838$, que não diferiram estatisticamente entre si. Já os menores valores foram registrados na amostra com $a_w = 0,5279$ e, especialmente, em $a_w = 0,802$, indicando uma mudança no matiz da cor da casca, com menor contribuição de tons amarelados e maior predominância de tonalidades avermelhadas.

Amêndoa

As figuras 49 e 50 apresentam os parâmetros de cor das amêndoas das castanhas dos lotes Juara e Aripuanã, respectivamente, submetidas à isoterma de adsorção a 25 °C.

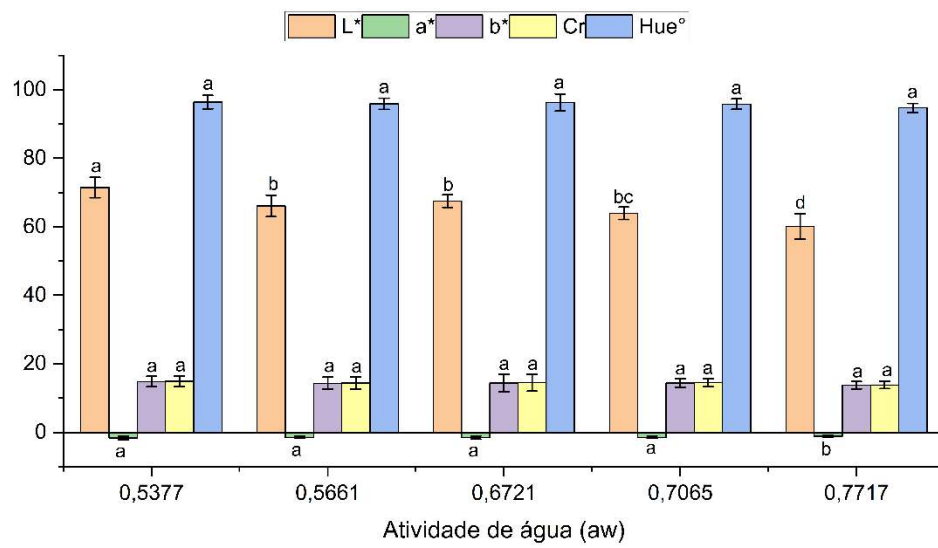


Figura 49. **Parâmetros de cor das amêndoas de castanhas-do-brasil do lote Juara submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de adsorção a 25 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

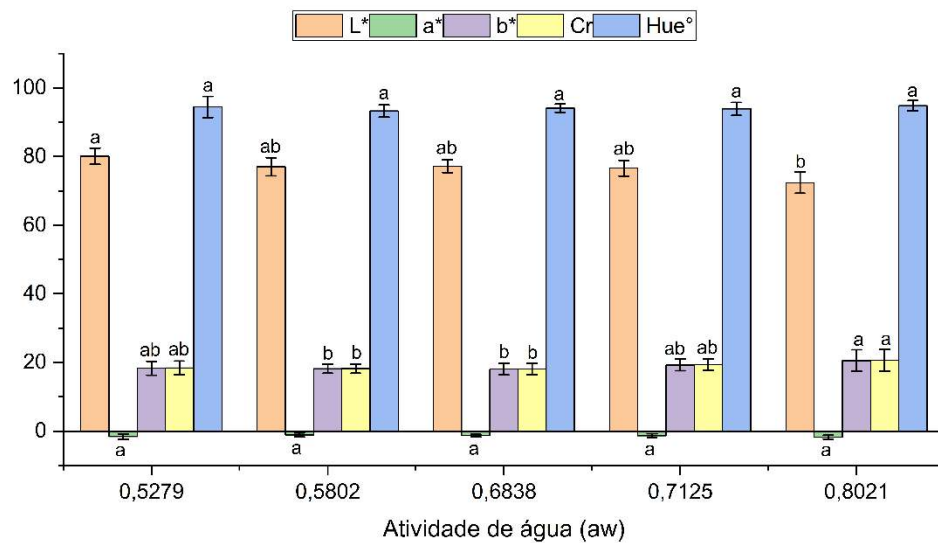


Figura 50. Parâmetros de cor das amêndoas de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de adsorção a 25 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

- **Coordenada L*:**

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da aw na luminosidade (coordenada L*) da amêndoa de castanhas do lote Juara, ($p < 0,05$; $F = 27,04 > F \text{ crítico} = 2,54$). O teste de Tukey revelou que a luminosidade diminuiu progressivamente à medida que a aw aumentou durante a adsorção de água. O maior valor de L* foi observado na amostra com $aw = 0,5377$, significativamente superior às demais amostras. Em contrapartida, o menor valor foi registrado para $aw = 0,7717$. A transição entre as médias intermediárias ($aw = 0,6721$, $0,5661$ e $0,7065$) mostrou diferenças significativas entre si ou com outras amostras, refletindo o impacto contínuo da elevação da aw na redução da luminosidade da amêndoa das castanhas do lote Juara.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da a_w sobre a coordenada L^* da amêndoa da castanha-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 14,80 > F$ crítico = 2,54), demonstrando que diferentes níveis de a_w influenciaram a luminosidade da amostra. O teste de Tukey revelou que a amostra com $a_w = 0,5279$ apresentou valor médio de L^* significativamente superior à amostra com $a_w = 0,8021$ ($p < 0,05$), indicando uma amêndoa mais clara nessa condição de menor a_w . Embora as amostras com $a_w = 0,5802$, $0,6838$ e $0,7125$ não tenham se diferenciado significativamente entre si, nem em relação à amostra mais clara ($a_w = 0,5279$), todas apresentaram valores de L^* intermediários, formando um grupo homogêneo.

- **Coordenada a^* :**

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo ($p < 0,05$; $F = 2,86 > F$ crítico = 2,54) da a_w na coordenada a^* da amêndoa do lote Juara, demonstrando que o processo de adsorção influenciou a tonalidade da cor dessa fração. Conforme o teste de Tukey, apenas o grupo com maior a_w (0,7717) apresentou valor significativamente diferente, com aumento no valor de a^* (mais próximo de zero), o que indica uma coloração menos esverdeada. Já os demais grupos (a_w entre 0,5377 e 0,7065) não diferiram entre si, mantendo valores negativos de a^* , característicos de tonalidade esverdeada.

A análise de variância (ANOVA) indicou que não houve efeito significativo da a_w sobre a coordenada a^* da amêndoa de castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p = 0,06$; $F = 2,43 < F$ crítico = 2,54). As médias da coordenada a^* variaram de $-1,1$ ($a_w = 0,5802$) a $-1,7$ ($a_w = 0,8021$), indicando predomínio de tonalidades esverdeadas em todas as condições de a_w testadas. Embora haja uma tendência de redução da coordenada a^* com o aumento da a_w , esse comportamento não foi estatisticamente significativo dentro do nível de significância adotado ($p < 0,05$).

- **Coordenada b*:**

A análise de variância (ANOVA) indicou ausência de efeito significativo da aw sobre a coordenada b* da amêndoa da castanha-do-brasil do lote Juara ($p = 0,67$; $F = 0,60 < F \text{ crítico} = 2,54$). Dessa forma, as variações na aw não promoveram alterações estatisticamente significativas na tonalidade da amêndoa. As médias da coordenada b* variaram de 13,78 a 14,83, indicando predominância de tonalidades amareladas nas amostras.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo ($p < 0,05$; $F = 3,08 > F \text{ crítico} = 2,54$) para a coordenada b* da amêndoa da castanha-do-brasil do lote Aripuanã, demonstrando que houve variação estatisticamente relevante entre as amostras analisadas. As médias variaram de 18,08 a 20,58, que representa um espectro de coloração amarela moderada a mais intensa, considerando que valores positivos de b* indicam tendência ao amarelo. Segundo o teste de Tukey, a amostra com aw = 0,8021 apresentou valor significativamente mais elevado de b* em comparação às amostras com aw = 0,5802 e 0,6838, sugerindo intensificação da coloração amarelada em condição de maior valor de aw.

- **Parâmetro Croma (Cr):**

A análise de variância (ANOVA) para o parâmetro Cr da amêndoa da castanha-do-brasil do lote Juara revelou ausência de diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($p = 0,62$; $F = 0,67 < F \text{ crítico} = 2,54$). Isso indica que a variação da aw no intervalo estudado não afetou de forma significativa a intensidade de cor da amêndoa.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da aw sobre o parâmetro Cr da amêndoa da castanha-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 3,16 > F \text{ crítico} = 2,54$). As médias variaram de 18,13 a 20,65, indicando que a intensidade da cor da amêndoa aumentou com a elevação da aw, sobretudo nos valores mais elevados de aw. O teste de Tukey revelou que a

amostra submetida a maior a_w ($a_w = 0,8021$) apresentou valor significativamente mais elevado de Cr em comparação às amostras com $a_w = 0,5802$ e $0,6838$, sugerindo maior saturação da cor nesta condição. Já as amostras em a_w intermediárias ($a_w = 0,5279$ e $0,7125$) não diferiram significativamente das demais.

- **Ângulo Hue:**

A análise de variância (ANOVA) não revelou diferenças estatisticamente significativas no ângulo Hue da película da castanha-do-brasil do lote Juara entre as diferentes a_w avaliadas na isoterma de adsorção a $25\text{ }^\circ\text{C}$ ($p = 0,16$; $F = 1,70 < F \text{ crítico} = 2,54$). As médias variaram de $94,7$ a $96,4^\circ$, indicando uma coloração com tonalidade predominantemente amarelada tendendo ao alaranjado, com pouca variação perceptível entre os tratamentos.

A análise de variância (ANOVA) indicou ausência de efeito significativo da a_w sobre o ângulo Hue da amêndoa do lote Aripuanã ($p = 0,39$; $F = 1,05 < F \text{ crítico} = 2,54$). As médias do ângulo Hue variaram de $93,3$ a $94,8^\circ$, indicando tonalidades amareladas semelhantes entre os tratamentos, sem alteração significativa da matriz percebida com o aumento da a_w .

Película

As figuras 51 e 52 apresentam os parâmetros de cor da película aderida às amêndoas das castanhas dos lotes Juara e Aripuanã, respectivamente, submetidas à isoterma de adsorção a $25\text{ }^\circ\text{C}$.

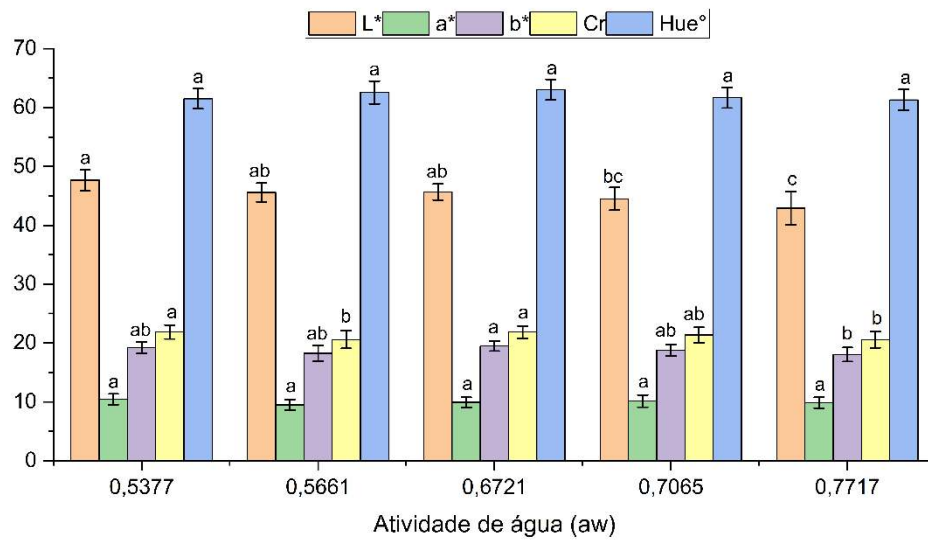


Figura 51. **Parâmetros de cor da película de amêndoas das castanhas-do-brasil do lote Juara submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de adsorção a 25 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

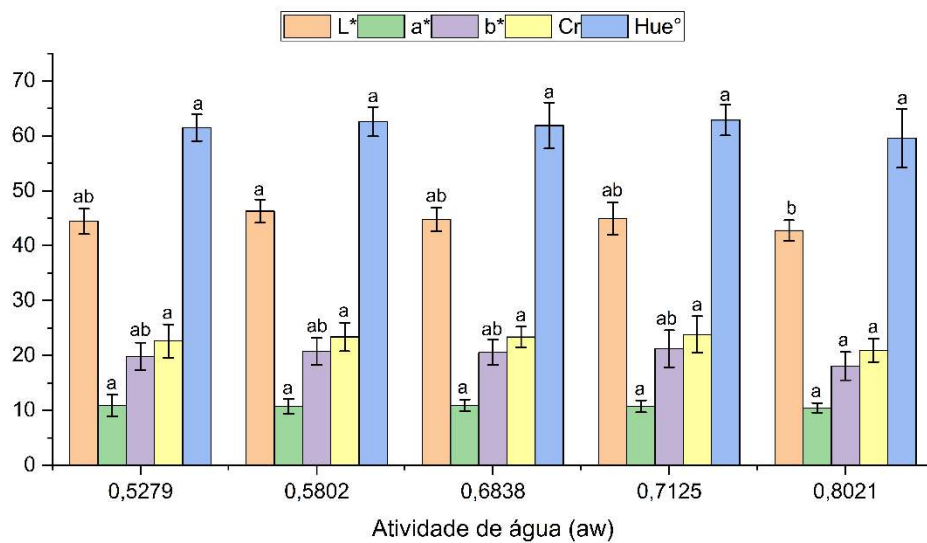


Figura 52. **Parâmetros de cor da película de amêndoas das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã submetidas a diferentes atividades de água (aw) na isoterma de adsorção a 25 °C. Médias seguidas pelas mesmas letras para o mesmo parâmetro colorimétrico não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).**

- **Coordenada L*:**

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da aw sobre a coordenada L* da película das castanhas-do-brasil do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 9,44 > F \text{ crítico} = 2,54$). As médias variaram de 42,9 a 47,7, indicando que a película apresentou maior luminosidade nos teores mais baixos de aw, com escurecimento progressivo conforme a aw aumenta. A amostra com aw = 0,5377 apresentou a maior média de L*, estatisticamente superior à amostra com aw = 0,7717, que foi a mais escura.

A análise de variância (ANOVA) evidenciou diferença significativa entre as amostras quanto a coordenada L* da película das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 3,60 > F \text{ crítico} = 2,54$), indicando que a aw influenciou a luminosidade das amostras. O teste de Tukey confirmou essa variação, revelando que a amostra com aw = 0,5802 apresentou maior

luminosidade média, diferindo significativamente da amostra com $a_w = 0,8021$, o qual exibiu a menor valor médio da coordenada L^* .

- **Coordenada a^***

A análise de variância (ANOVA) indicou ausência de efeito significativo da a_w sobre a coordenada a^* da película das castanhas-do-brasil do lote Juara ($p = 0,16$; $F = 1,71 < F$ crítico = 2,54). Isso demonstra que, apesar de pequenas variações numéricas entre os valores médios, não houve diferença estatística relevante que permita afirmar que as amostras apresentaram colorações distintas no eixo vermelho-verde do lote Juara.

A análise de variância (ANOVA) também indicou ausência de efeito significativo da a_w sobre a coordenada a^* da película das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p = 0,93$; $F = 0,21 < F$ crítico = 2,54), indicando que a variação da a_w não exerceu influência estatisticamente significativa sobre a tendência de coloração avermelhada da película deste lote Aripuanã.

- **Coordenada b^* :**

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da a_w sobre a coordenada b^* da película das castanhas-do-brasil do lote Juara ($p < 0,05$; $F = 3,73 > F$ crítico = 2,54). As amostras com $a_w = 0,6721$ apresentaram os maiores valores de b^* , diferindo significativamente daquelas com $a_w = 0,7717$, que apresentaram os menores valores. As demais condições ($a_w = 0,5377$, 0,5661 e 0,7065) formaram um grupo intermediário, sem diferença significativa entre si nem em relação aos extremos, o que sugere uma zona de transição onde as mudanças cromáticas ainda não atingem níveis expressivos de alteração estatística.

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da a_w sobre a coordenada b^* da película das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p < 0,05$; $F = 2,57 > F$ crítico = 2,54). As amostras submetidas a $a_w = 0,7125$ apresentaram os maiores valores médios de b^* , diferindo significativamente daquelas com $a_w = 0,8021$, que apresentaram os menores valores. As demais condições ($a_w = 0,5279$, 0,5802 e 0,6838), formaram um grupo intermediário, pois não diferiram significativamente nem do grupo com maior coloração ($a_w = 0,7125$) nem do de menor coloração ($a_w = 0,8021$).

- **Parâmetro Cromo (Cr):**

A análise de variância (ANOVA) indicou efeito significativo da a_w sobre o parâmetro Cr da película das castanhas-do-brasil do lote Juara ($p = 0,02$; $F = 3,05 > F$ crítico = 2,54). Os valores de Cr não apresentaram um padrão linear de variação com o aumento da a_w , evidenciando um comportamento oscilante. As amostras mantidas em $a_w = 0,5377$ e 0,6721 apresentaram os maiores valores médios, com diferenças estatísticas significativas em relação aos grupos com menor saturação ($a_w = 0,5661$ e 0,7717). As amostras em $a_w = 0,7065$ compuseram um grupo intermediário, não diferindo estatisticamente de nenhum dos extremos.

A análise de variância (ANOVA) indicou ausência de efeito significativo da a_w sobre o parâmetro Cr da película das castanhas-do-brasil do lote Aripuanã ($p = 0,08$; $F = 2,19 < F$ crítico = 2,54). Esse resultado demonstra que a variação a_w não exerceu influência estatisticamente relevante sobre a intensidade da coloração da película.

- **Ângulo Hue:**

A análise de variância (ANOVA) indicou ausência de efeito significativo da a_w sobre o ângulo Hue da película da castanha-do-brasil do lote Juara ($p = 0,09$; $F = 2,16 < F \text{ crítico} = 2,54$). Esses resultados sugerem que a coloração percebida na angulação Hue, associada à tonalidade geral da amostra, não foi sensivelmente influenciada pelas variações de a_w no intervalo avaliado.

A análise de variância (ANOVA) indicou ausência de efeito significativo da a_w o ângulo Hue da película da castanha-do-brasil do lote Aripuanã ($F = 1,53 < F \text{ crítico} = 2,54$; $p = 0,21$). Esse resultado indica que as variações nos níveis de a_w não influenciaram significativamente a tonalidade de cor da película deste lote.

Análise comparativa da cor das castanhas Juara e Aripuanã submetidas às isotermas de adsorção a 25 °C

A análise global dos efeitos da a_w sobre os parâmetros de cor das castanhas-do-Brasil dos lotes Juara e Aripuanã submetidos ao ensaio de adsorção a 25 °C revelou variações entre os lotes e entre as diferentes frações analisadas (casca, amêndoa e película). Dentre os parâmetros de cor avaliados, a luminosidade (L^*) destacou-se por sua sensibilidade a variação da a_w , especialmente no lote Juara, enquanto o ângulo Hue apresentou maior estabilidade na maioria das frações.

Na casca, observou-se comportamento diferenciado entre os lotes frente a variação da atividade de água. A luminosidade (L^*) manteve-se estável em Juara ($p > 0,05$), enquanto Aripuanã apresentou redução significativa apenas em condição mais úmida, evidenciando escurecimento pontual. A coordenada a^* variou significativamente apenas em Juara, com aumento na faixa intermediária de umidade; em Aripuanã, manteve-se estável. A coordenada b^* apresentou redução significativa apenas em

Aripuanã sob condição mais úmida, mantendo-se estável em Juara. O Croma seguiu o mesmo padrão: estável em Juara e com redução significativa em Aripuanã na condição de maior aw. O ângulo de matiz (Hue) reduziu em ambos os lotes nas condições mais úmidas, com efeito mais pronunciado em Aripuanã.

Na amêndoa, ambos os lotes apresentaram redução significativa da luminosidade (L^*) com o aumento da aw, sendo a queda mais acentuada em Juara nas condições mais úmidas (Figura 53 e 54). A coordenada a^* variou significativamente apenas em Juara, com aumento em faixa intermediária de umidade; em Aripuanã, manteve-se estável. A coordenada b^* apresentou variação significativa apenas em Aripuanã, com maior intensidade amarela em condição mais úmida; em Juara, manteve-se estável. O Croma acompanhou esses padrões: estável em Juara e maior em condição mais úmida em Aripuanã. O Hue manteve-se estável em ambos os lotes ($p > 0,05$).

Na película, a luminosidade (L^*) variou significativamente em ambos os lotes, porém com padrões semelhantes: em Juara, o maior valor foi registrado na condição de menor aw, com redução progressiva à medida que a umidade aumentou, atingindo o menor valor na condição mais úmida. Em Aripuanã, a maior luminosidade ocorreu em faixa intermediária de aw, também com redução para o menor valor na condição mais úmida. Em ambos os casos, observa-se tendência de menor claridade superficial em alta umidade. A coordenada a^* manteve-se estável em ambos os lotes ($p > 0,05$). A coordenada b^* variou significativamente em ambos os lotes, apresentando valores mais elevados em faixa de atividade de água 0,6-0,7 e menores em condição mais úmida. O Croma apresentou variação significativa apenas em Juara, acompanhando o padrão de b^* . O Hue não apresentou diferenças estatísticas em nenhum dos lotes ($p > 0,05$).

Em síntese, o lote Juara se mostrou mais sensível às variações de aw, especialmente na luminosidade e nas frações internas da castanha, como a amêndoa e a película. O lote Aripuanã, por sua vez, apresentou respostas mais marcantes nos parâmetros de cor da casca e da amêndoa, com maior variação na intensidade e tonalidade da cor. A película foi a fração com comportamento mais estável em relação à coordenada a^* , enquanto o ângulo Hue mostrou-se o parâmetro de menor variação global, sendo

significativamente alterado apenas na casca. Esses resultados demonstram a importância de considerar as características específicas de cada lote e fração ao avaliar os efeitos da aw na qualidade visual das castanhas-do-brasil.

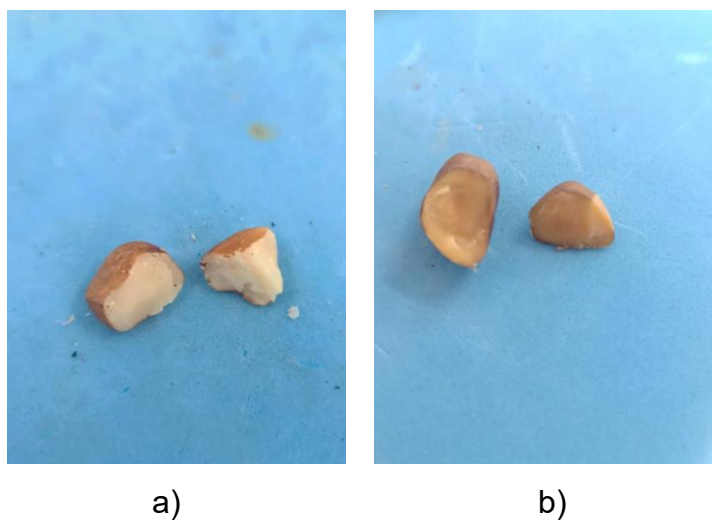


Figura 53. a) Amêndoa Juara de castanha com $aw = 0,5377$ em isoterma de adsorção a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, b) Amêndoa Juara de castanha com $aw = 0,7717$ em isoterma de adsorção a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 54. a) Amêndoa Aripuanã de castanha com $aw = 0,5279$ em isoterma de adsorção a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, b) Amêndoa Aripuanã de castanha com $aw = 0,8021$ em isoterma de adsorção a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais aplicada aos lotes Juara e Aripuanã submetidos à dessorção a 60 °C explicou, respectivamente 85,23 % e 85,81% da variância no plano PC1×PC2 (Figuras 55 e 56). As Tabelas 21 e 22 mostram as variâncias explicadas e cumulativas para cada um dos componentes principais.

Tabela 21. **Variância explicada e cumulativa ao longo das componentes principais da análise dos dados do lote Juara submetido na dessorção a 60 °C.**

PC	Variância explicada (%)	Variância Cumulativa (%)
1	57,62	57,62
2	27,61	85,23
3	7,75	92,97
4	4,33	97,30
5	1,48	98,78
6	1,22	100,00
7	0,00	100,00

PC = Componente principal

Tabela 22. **Variância explicada e cumulativa ao longo das componentes principais da análise dos dados do lote Aripuanã na dessorção a 60 °C.**

PC	Variância explicada (%)	Variância Cumulativa (%)
1	56,64	56,64
2	29,17	85,81
3	7,67	93,49
4	3,59	97,07
5	2,58	99,65
6	0,35	100,00
7	0,00	100,00

PC = Componente principal

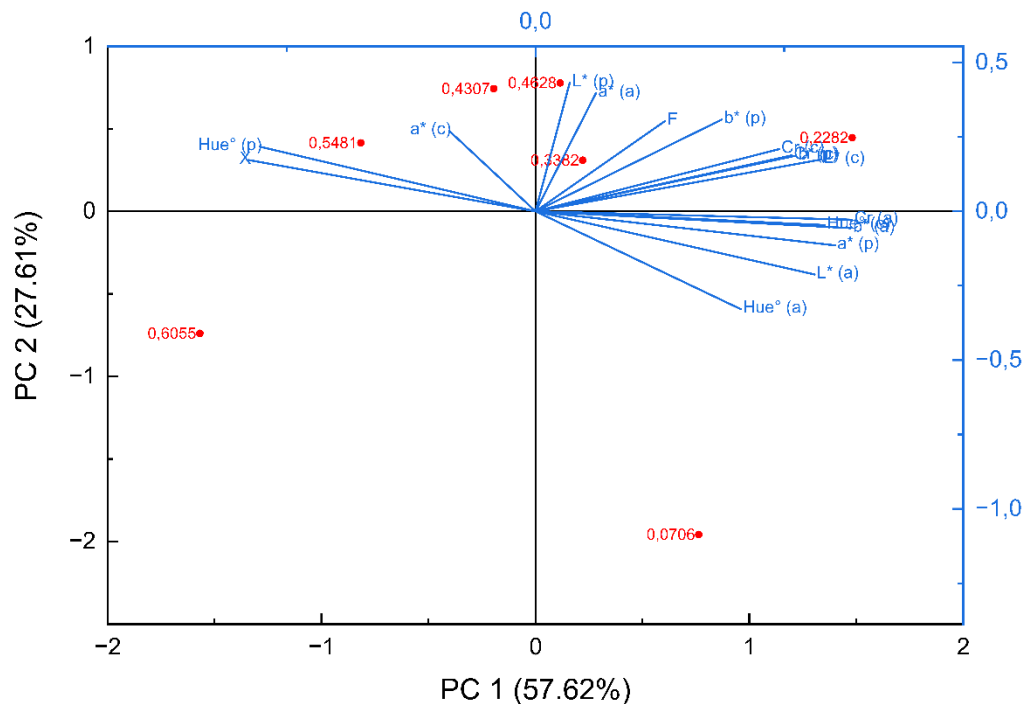


Figura 55. **Análise de Componentes Principais. Projeção das variáveis (vetores) e das amostras (atividades de água) nos dois primeiros componentes principais (PC1×PC2) - Juara, dessorção a 60 °C.** X = umidade (b.s); F = força de ruptura da casca (N); L*, a*, b*, Cr*, Hue° = parâmetros colorimétricos; (c) = casca; (a) = amêndoa; (p) = película.

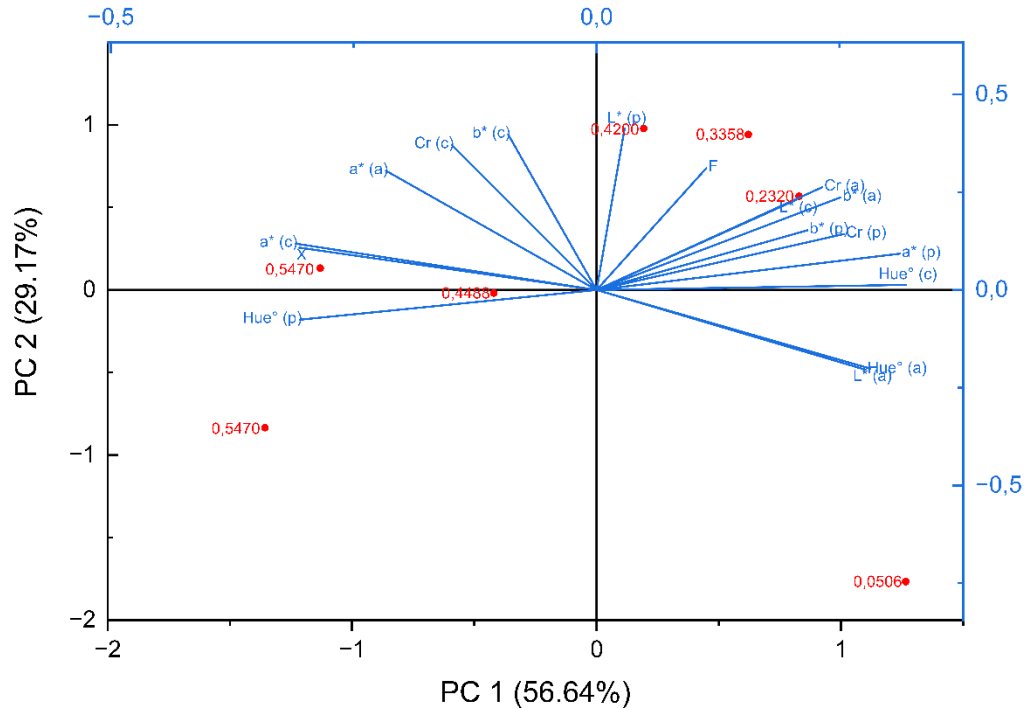


Figura 56. **Análise de Componentes Principais. Projeção das variáveis (vetores) e das amostras (atividades de água) nos dois primeiros componentes principais (PC1×PC2) - Aripuanã, dessorção a 60 °C.** X = umidade em base seca; F = força de ruptura da casca (N); L^* , a^* , b^* , Cr^* , Hue° = parâmetros colorimétricos; (c) = casca; (a) = amêndoa; (p) = película.

Na análise de componentes principais aplicada ao lote Juara submetido a dessorção a 60 °C, o primeiro componente (PC1) descreveu o gradiente de dessorção: a redução da atividade de água (a_w) e da umidade (X) deslocou as amostras para valores positivos de PC1, representando uma correlação negativa. Estando, portanto, associada a L^* e b^* mais altos nas três frações e a Cr^* maior principalmente em casca e amêndoa; observou-se a^* menor na casca e maior na película, com Hue° mais alto em casca e amêndoa e mais baixo na película. Em condições de a_w elevadas, verificou-se o padrão inverso, com menor luminosidade e maior a^* na casca, além de Hue° mais alto na película. O PC2 representou um eixo mecânico-óptico: a força de ruptura (F) apresentou coeficiente positivo relevante e se associou a película mais luminosa e amarelada e a maior avermelhamento em amêndoa e casca.

Como os escores de PC2 (valores que representam a posição das amostras nesse eixo) são mais altos nas a_w intermediárias, a força é máxima nesse intervalo e menor tanto em a_w mais elevada quanto mais baixa, caracterizando um comportamento não linear da resistência em função da água.

Os rótulos de cada ponto no gráfico são os valores de a_w , o que confirma a leitura do gradiente de dessecção: as amostras com maior atividade de água ($a_w = 0,6055$ e $0,5481$) concentram-se no lado negativo de PC1, com casca mais escura e maior $a^*(c)$, enquanto com menor atividade de água ($a_w = 0,2282$ e $0,0706$) aparecem no lado positivo de PC1, associadas a maior luminosidade. As a_w intermediárias ($0,4307$ e $0,4628$) ocupam a região de valores mais altos de PC2, onde a força de ruptura da casca é máxima, caindo novamente no extremo mais seco ($a_w = 0,0706$), o que demonstra o comportamento não linear da resistência em função da água.

Na análise de componentes principais aplicada ao lote Aripuanã na dessecção a $60\text{ }^\circ\text{C}$, PC1 descreveu também o gradiente de dessecção: a redução da atividade de água (a_w) e da umidade (X) deslocou as amostras para valores mais altos de PC1 e esteve associada, sobretudo, em amêndoa e película, a maiores L^* , b^* e Cr^* , além de elevação do matiz (Hue°) em casca e amêndoa e redução do matiz na película. Em atividades de água elevadas, verificou-se o padrão oposto: menor luminosidade (L^*) e maior componente vermelho (a^*) mais evidente na casca e de forma discreta na amêndoa, coerente com a aparência mais escura das amostras e com matiz mais alto na película. PC2 representou um eixo mecânico-óptico: a força de ruptura da casca apresentou coeficiente positivo relevante e se associou a película mais luminosa e a amêndoa mais avermelhada/saturada; por outro lado, valores negativos de PC2 relacionaram-se a amêndoa menos luminosa e de matiz mais alto. Como os maiores valores de PC2 ocorreram em a_w intermediárias, a resistência da casca mostrou-se máxima nesse intervalo, sendo menor tanto em a_w mais altas quanto nas mais baixas.

Os rótulos de cada ponto no gráfico correspondem aos valores de a_w . As amostras mais úmidas ($a_w = 0,6010$ e $0,5470$), localizam-se no lado negativo de PC1, associadas a menor luminosidade e coloração mais escura nas frações externas. A transição ocorre em $a_w = 0,4488$, próxima ao centro

do plano, marcando o início do clareamento e do aumento da força. Nas condições mais secas ($a_w = 0,3358$ e $0,2320$), os pontos se deslocam para o lado positivo de PC1, indicando maior resistência, película mais luminosa e casca mais amarela/saturada. No extremo seco ($a_w = 0,0506$), o ponto se mantém à direita de PC1, mas com PC2 negativo, sugerindo queda na força e leve alteração de matiz nas frações internas.

A análise de componentes principais aplicada aos lotes Juara e Aripuanã submetidos à adsorção a 25 °C explicou, respectivamente, 81,45% e 92,58% da variância no plano PC1×PC2 (Figura 40 e 41). A Tabela 23 e 24 mostram as variâncias explicadas e cumulativas para cada um dos componentes principais.

Tabela 23. Variância explicada e cumulativa ao longo das componentes principais da análise dos dados do lote Juara na adsorção a 25 °C.

PC	Variância explicada (%)	Variância Cumulativa (%)
1	60,23	60,23
2	21,22	81,45
3	10,82	92,27
4	7,73	100,00
5	0,00	100,00

PC = Componente principal

Tabela 24. Variância explicada e cumulativa ao longo das componentes principais da análise dos dados do lote Aripuanã na adsorção a 25 °C.

PC	Variância explicada (%)	Variância Cumulativa (%)
1	74,91	74,91
2	17,67	92,58
3	5,45	98,03
4	1,97	100,00
5	0,00	100,00

PC = Componente principal

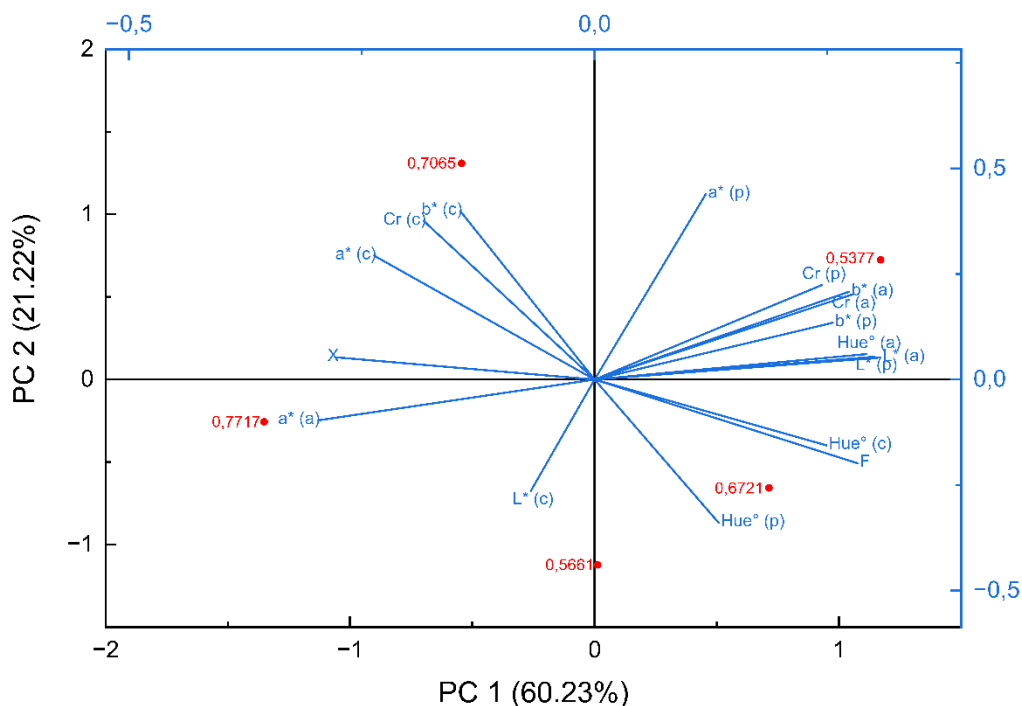


Figura 57. Análise de Componentes Principais (PCA). Projeção das variáveis (vetores) e das amostras (atividades de água) nos dois primeiros componentes principais (PC1×PC2) - Juara, adsorção a 25 °C. X = umidade em base seca; F = força de ruptura da casca (N); L*, a*, b*, Cr*, Hue° = parâmetros colorimétricos; (c) = casca; (a) = amêndoa; (p) = película.

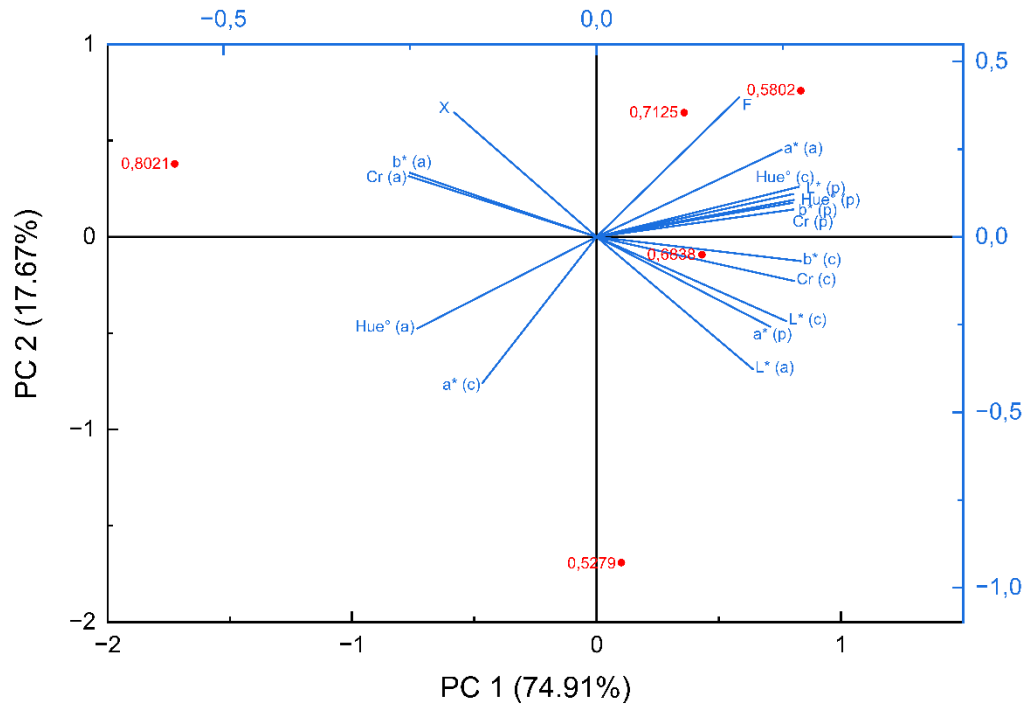


Figura 58. **Análise de Componentes Principais (PCA). Projeção das variáveis (vetores) e das amostras (atividades de água) nos dois primeiros componentes principais (PC1×PC2) - Aripuanã, adsorção a 25 °C.** X = umidade em base seca; F = força de ruptura da casca (N); L*, a*, b*, Cr*, Hue° = parâmetros colorimétricos; (c) = casca; (a) = amêndoa; (p) = película.

Na análise de componentes principais aplicada ao lote Juara submetido à isoterma de adsorção a 25 °C, PC1 descreveu o gradiente de adsorção, confirmando que o aumento da atividade de água (a_w) e da umidade (X) esteve associado a redução da força de ruptura da casca, menor luminosidade (L^*), menor b^* e menor croma (Cr), além de ajustes de matiz (Hue°). Quando a a_w diminui (condição mais seca), observa-se o padrão oposto, com força maior, clareamento (L^*), amarelecimento (b^*) e aumento de saturação (Cr), sobretudo em amêndoa e película. Nas condições de a_w elevadas, verificou-se luminosidade menor, maior contribuição do componente vermelho (a^*) e casca menos resistente, resultando em aparência mais escura e textura mais plástica. O segundo componente (PC2) destacou variações ópticas secundárias: amostras com PC2 positivo apresentaram película mais avermelhada e casca

mais amarela/saturada; com PC2 negativo, observaram-se casca mais luminosa e maior força. Essas diferenças não seguem o gradiente linear da adsorção, refletindo ajustes pigmentares e estruturais parcialmente independentes da água.

Os rótulos de cada ponto no gráfico correspondem aos valores de a_w . As amostras com $a_w = 0,7717$ e $0,7065$, agrupam-se no lado esquerdo de PC1, caracterizando o estado mais úmido, com casca mais escura, maior contribuição de $a^*(c)$ e menor $Cr(c)$. Em $a_w = 0,6721$, observa-se posição intermediária no plano, marcando a transição entre escurecimento e clareamento e o início do aumento da força de ruptura. Nas condições mais secas, $a_w = 0,5661$ e $0,5377$, à direita de PC1, predominam maior força, maior luminosidade e tons mais amarelados (b^* , Cr), sobretudo em amêndoa e película.

Na análise de componentes principais aplicada ao lote Aripuanã submetido à isoterma de adsorção a $25\text{ }^\circ\text{C}$, PC1 descreve o gradiente de adsorção, indicando que o aumento da atividade de água (a_w) e da umidade (X) esteve associado a menor luminosidade (L^*), redução de b^* e croma (Cr), além de ajustes de matiz (Hue°) nas três frações. À medida que a a_w diminui, ocorre clareamento (L^*), amarelecimento (b^*) e aumento de saturação (Cr), principalmente em amêndoa e película. Em a_w elevadas, verificou-se o padrão oposto, com maior componente vermelho (a^*) e casca mais escura. O segundo componente (PC2) representa um eixo mecânico-óptico, no qual a força de ruptura (F) apresentou coeficiente positivo relevante e se associou a película mais luminosa e casca mais amarela/saturada. As amostras posicionadas em valores positivos de PC2 correspondem a a_w intermediárias, nas quais a resistência da casca foi máxima, enquanto em a_w muito altas ou muito baixas a força diminuiu, evidenciando comportamento não linear. Essas diferenças não seguem o gradiente principal de adsorção, refletindo ajustes estruturais e ópticos parcialmente independentes da água.

Os rótulos de cada ponto no gráfico correspondem aos valores de a_w . A amostra com $a_w = 0,8021$, localiza-se à esquerda de PC1, caracterizando o estado mais úmido, com casca escura, menor luminosidade e baixa força de ruptura. À medida que a a_w diminui para $0,7125$ e $0,6838$, as amostras ocupam região central e de PC2 positivo, onde a casca atinge maior resistência e a castanha se torna mais luminosa. Nas condições mais secas, $a_w = 0,5802$ e

0,5279, os pontos se deslocam para o lado direito de PC1, mantendo coloração mais clara e amarelada, porém com redução da força, reforçando o comportamento não linear da umidade sobre propriedades mecânicas e ópticas deste eixo.

Cinética de secagem das castanhas com casca

A construção da curva de cinética de secagem foi elaborada com os resultados obtidos de umidade em tempos determinados, totalizando 960 min (16h) de processo para ambos os lotes de castanha-do-brasil (Juara e Aripuanã). A curva de secagem das castanhas revelou um padrão típico de materiais vegetais, caracterizado por um processo conduzido inteiramente em regime de taxa decrescente, sem a ocorrência de uma fase inicial de taxa constante, quando $a_w = 1$ na superfície do sólido. Esse comportamento indica que o principal mecanismo de remoção de umidade foi governado pela difusão interna da água no interior do produto (BOTELHO et al., 2018; CAMICIA et al., 2015) (Figuras 59 e 60).

Apesar das diferenças observadas entre as amostras dos lotes Juara e Aripuanã nos experimentos de isotermas de sorção, o comportamento durante a secagem dinâmica em sistema de ar quente a 60 °C revelou perfis de perda de umidade semelhantes entre os materiais. A cinética de secagem de ambos os lotes seguiu trajetórias próximas ao longo do tempo, mesmo considerando que as castanhas do lote Juara apresentaram umidade inicial superior ($18,5 \pm 0,6$ g água/ 100 g b.s.) às do lote Aripuanã ($15,0 \pm 0,5$ g água/ 100 g b.s.). Ao final da secagem, os valores médios de umidade de equilíbrio atingidos foram de 5 ± 1 g água/ 100 g b.s. e a_w final de $0,36 \pm 0,02$ para Juara, e $3,9 \pm 0,4$ g água/100 g b.s. e a_w final de $0,261 \pm 0,006$ para Aripuanã.

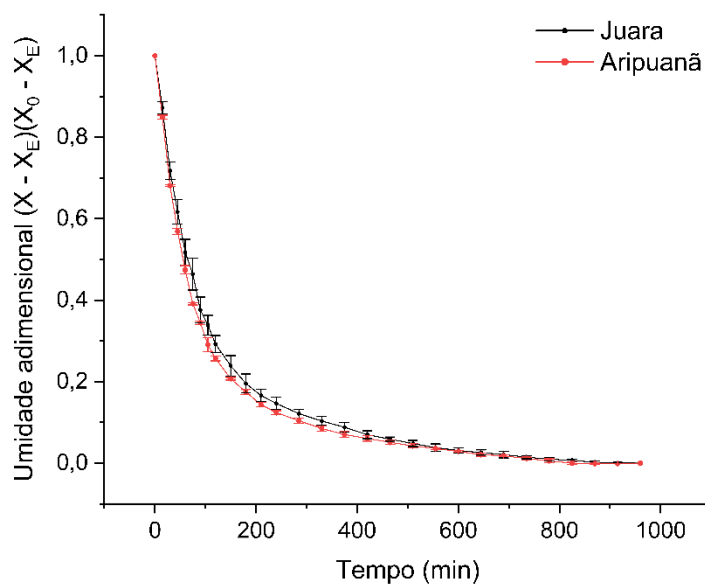


Figura 59. Umidade adimensional de castanhas dos lotes Juara e Aripuanã em função do tempo (em minutos) secas em sistema de ar quente a 60 °C.

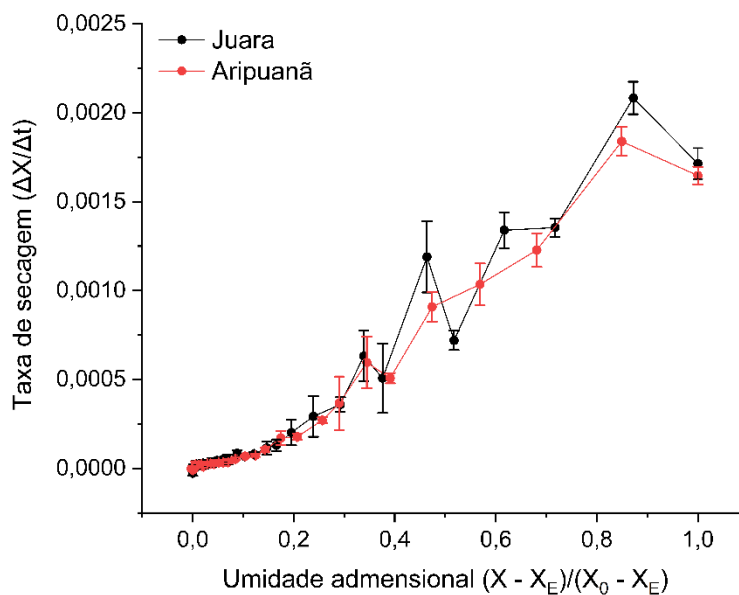


Figura 60. Taxa de secagem em função da umidade adimensional de castanhas dos lotes Juara e Aripuanã secas em túnel de ar quente a 60 °C.

A comparação estatística (teste t, $p < 0,05$) entre os lotes Juara e Aripuanã ao longo do processo de secagem revelou diferença significativa na umidade adimensional apenas no tempo de 105 minutos. Nesse intervalo, a castanha Juara apresentou maior MR (0,3388) em relação à Aripuanã (0,2904), com diferença estatisticamente significativa ($p = 0,0483$; $t = 2,81 > t_{\text{crítico}} = 2,77$). Nos demais tempos avaliados, não foram observadas diferenças estatísticas relevantes entre os lotes, indicando que, de forma geral, os perfis de secagem foram semelhantes.

Nas isotermas de adsorção e dessorção, observou-se que o lote Juara apresentou maior teor de umidade da monocamada (x_m), indicando maior capacidade de reter água nos sítios primários de adsorção. No entanto, também apresentou valores menores de C e k no ajuste pela equação de GAB, sugerindo menor afinidade da água com a matriz sólida e, portanto, maior facilidade de liberação da água ligada. O lote Aripuanã, por outro lado, apresentou valores inferiores de x_m e superiores de C e k, o que indica uma estrutura mais resistente à liberação da água, com ligações mais fortes entre a água e os constituintes da matriz.

Essa diferença de comportamento entre os lotes, evidenciada em ambiente controlado e estático das isotermas, não foi refletida no processo dinâmico de secagem. Na secagem em sistema com fluxo contínuo de ar quente, o processo é governado por fortes gradientes de temperatura e umidade, os quais favorecem a transferência de massa por convecção e diminuem o tempo de permanência da água no interior do material. Nesse tipo de sistema, a taxa de secagem é mais influenciada pelas condições externas do processo (temperatura do ar, velocidade do ar, umidade relativa) (HELDMAN & HARTEL, 2000) do que pelas propriedades de equilíbrio higroscópico do material. Dessa forma, as diferenças estruturais e higroscópicas observadas nas isotermas foram atenuadas durante a secagem forçada.

Outro aspecto relevante é que, apesar das castanhas *in natura* do lote Juara conterem maior umidade, sua menor afinidade com água pode ter facilitado a remoção da água superficial e ligada fracamente, resultando em uma taxa de secagem próxima à observada para nas castanhas de Aripuanã. Ao final do processo, ambos os lotes apresentaram teores de umidade finais

condizentes com os valores de x_m estimados na isoterma de adsorção, reforçando a utilidade prática deste parâmetro como referência para a definição de ponto final de secagem e para o armazenamento seguro do produto.

Portanto, a convergência dos resultados obtidos nas duas abordagens, apesar das metodologias distintas, contribui para uma compreensão mais abrangente do comportamento higroscópico da castanha-do-brasil com casca, e destaca a importância de integrar análises estáticas e dinâmicas para fundamentar decisões tecnológicas no beneficiamento do produto.

A avaliação da qualidade do ajuste dos modelos aos dados experimentais evidenciou desempenho satisfatório para os três modelos testados, com coeficientes de determinação elevados ($R^2 > 0,98$) e baixos valores de qui-quadrado ($X^2 < 0,002$) em todos os ensaios. Os melhores resultados foram obtidos por meio da equação de Page, com $R^2 > 0,99$ e menores valores de X^2 (Tabela 25 e Figura 61).

Observa-se que, para cada modelo, os parâmetros estimados foram extremamente próximos entre as castanhas Juara e Aripuanã, reforçando matematicamente o comportamento semelhante de secagem em túnel de ar quente apresentado pelos dois lotes.

Tabela 25. Valores dos parâmetros de modelos ajustados para as curvas de secagem das castanhas Juara e Aripuanã.

Modelo	Lote	Parâmetros dos modelos			Parâmetros estatísticos	
		K	n	a	R ²	χ ²
Newton	J	0,01 ± 3,04×10 ⁻⁴			0,9854	0,0011
	A	0,01 ± 3,70×10 ⁻⁴			0,9837	0,0012
Page	J	0,023 ± 0,003	0,81 ± 0,03		0,9942	4,67×10 ⁻⁴
	A	0,028 ± 0,004	0,79 ± 0,03		0,9936	4,87×10 ⁻⁴
Henderson & Pabis	J	0,009 ± 3,91×10 ⁻⁴		0,96 ± 0,02	0,9867	0,0011
	A	0,01 ± 4,74×10 ⁻⁴		0,96 ± 0,02	0,985	0,0011

Todos os parâmetros estimados foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste t. J= Juara, A= Aripuanã.

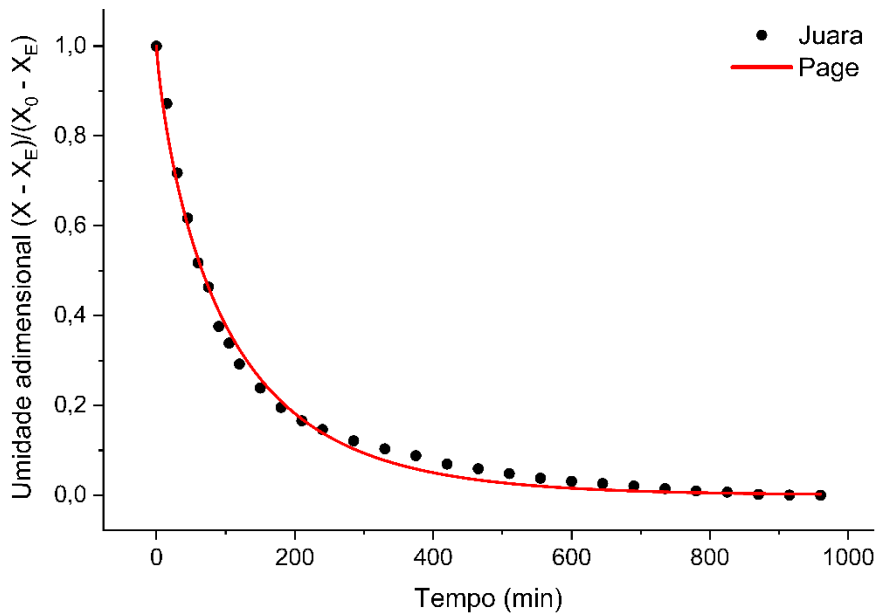


Figura 61. Ajuste do modelo Page aos dados experimentais de secagem das castanhas Juara em termos da umidade adimensional em função do tempo.

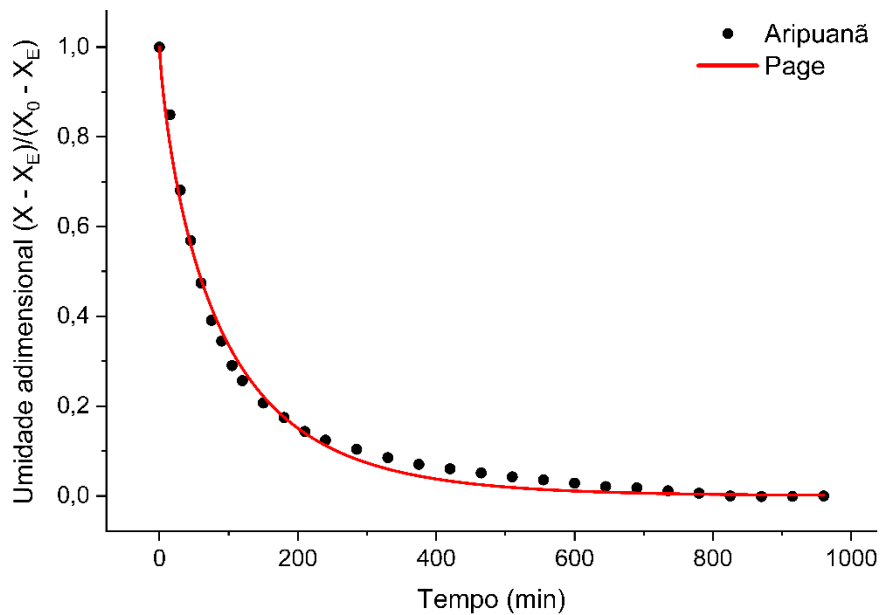


Figura 62. **Ajuste do modelo Page aos dados experimentais de secagem das castanhas Aripuanã em termos da umidade adimensional em função do tempo.**

Embora os resultados da cinética de secagem tenham revelado um comportamento global semelhante entre os lotes Juara e Aripuanã durante o processo dinâmico de dessorção da água no sistema de secagem com ar quente a 60 °C, é importante destacar um aspecto tecnológico relevante observado anteriormente: as castanhas de Juara submetidas ao processo de dessorção, apresentaram valores significativamente superiores de força de ruptura da casca em todas as faixas de aw analisadas em relação as castanhas de Aripuanã.

Considerando que, na prática industrial da cooperativa, a secagem é realizada em tambor rotativo, onde as castanhas permanecem em constante movimento e submetidas a impactos mecânicos contínuos, tanto entre si quanto contra as paredes do equipamento, essa diferença na resistência mecânica da casca se torna crítica. A maior dureza observada nas castanhas do lote Juara pode contribuir para uma maior incidência de danos mecânicos, incluindo quebra das amêndoas, especialmente quando processadas em conjunto com castanhas mais “frágeis”, como as do lote Aripuanã.

Assim, os dados sugerem que a elevada frequência de amêndoas quebradas identificadas ao final da etapa de descascamento pode ter origem ainda na etapa de secagem, intensificada pelo processamento conjunto de lotes com propriedades físicas distintas. Portanto, o presente estudo não apenas evidencia a importância de avaliar a cinética de secagem em termos globais de perda de umidade, mas também aponta a necessidade de tratamento diferenciado de lotes conforme suas características morfológicas e mecânicas, de modo a preservar a qualidade física do produto e reduzir perdas quantitativas e econômicas ao longo do processo de beneficiamento.

Contração volumétrica das castanhas Juara e Aripuanã submetidas à secagem em bandejas

Apresentam-se, na Tabela 26, os valores de volume inicial e volume final, bem como a contração volumétrica (%) das castanhas dos lotes Juara e Aripuanã submetidas à secagem em bandejas.

Tabela 26. **Variação de volume e contração volumétrica das castanhas Juara e Aripuanã após secagem em bandejas.**

	Castanhas	
	Lote Juara	Lote Aripuanã
Volume inicial (cm ³)	7,4 ± 0,1 ^b	9,8 ± 0,7 ^a
Volume final (cm ³)	5,7 ± 0,2 ^b	7,8 ± 0,6 ^a
Contração Volumétrica (%)	22,3 ± 1,6 ^a	20,4 ± 0,2 ^a

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não diferem entre si pelo teste t (p < 0,05).

Na caracterização inicial das castanhas, já havia sido observado que o lote Aripuanã apresentava dimensões significativamente superiores as do

lote Juara, com maiores valores médios de comprimento, largura e espessura. Esse padrão morfológico se refletiu também nos volumes calculados, com o lote Aripuanã apresentando volume inicial médio de $9,8 \pm 0,7 \text{ cm}^3$, significativamente superior ao lote Juara, que apresentou $7,4 \pm 0,1 \text{ cm}^3$ ($p = 0,030$; $t = 5,64 > t \text{ crítico} = 4,30$).

Mesmo após a secagem em ar quente a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, o maior volume das castanhas de Aripuanã foi mantido. O volume final médio foi de $7,8 \pm 0,6 \text{ cm}^3$, frente a $5,7 \pm 0,2 \text{ cm}^3$ para Juara, com diferença estatística significativa ($p = 0,012$; $t = 5,54 > t \text{ crítico} = 3,18$). Esses resultados confirmam que, sob as mesmas condições de desidratação, Aripuanã retém maior volume absoluto, o que pode estar associado a maior robustez estrutural ou densidade inicial.

Contudo, ao se considerar a contração volumétrica percentual, ou seja, a perda relativa de volume em relação ao volume inicial de cada lote, não foi identificada diferença estatística significativa entre Juara ($22,3 \pm 1,6\%$) e Aripuanã ($20,4 \pm 0,2\%$) ($p = 0,167$; $t = 2,13 < t \text{ crítico} = 4,30$). Isso indica que, proporcionalmente, ambos os lotes encolheram de forma semelhante durante a secagem. Essa similaridade é coerente com os resultados previamente observados na cinética de secagem, na qual Juara e Aripuanã também apresentaram comportamento bastante próximo. Isso reforça que, do ponto de vista físico e higroscópico, os dois lotes respondem de maneira comparável ao processo de secagem a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, apesar das diferenças morfológicas.

Saber que as castanhas encolhem, em média, cerca de 20 a 22% de seu volume até atingir a umidade de equilíbrio é de grande relevância para o planejamento e controle do processo industrial. Essa informação permite prever a redução volumétrica do produto ao final da secagem, orientar ajustes na densidade de empacotamento e na ocupação de bandejas e embalagens, além de auxiliar no dimensionamento de estruturas de armazenamento.

Adicionalmente, o fato de as castanhas do lote Aripuanã manterem volume final significativamente maior após a secagem tem implicações diretas no processamento. Produtos com maior volume ocupam mais espaço por unidade, o que pode reduzir o número de castanhas por embalagem, diminuir a densidade de empacotamento e aumentar os custos de transporte e

armazenagem por peso útil. Por outro lado, em situações em que o produto é comercializado por unidade ou valorizado visualmente pelo tamanho, castanhas maiores podem representar vantagem competitiva, conferindo maior valor percebido. Assim, o conhecimento dessas diferenças físicas entre os lotes permite ajustar decisões logísticas, operacionais e comerciais, com vistas à otimização do processo como um todo.

CONCLUSÕES

A análise de castanhas provenientes de dois territórios indígenas produtores no estado do Mato Grosso, permitiu constatar variações nas características higroscópicas, morfológicas e físicas entre os materiais. O lote do território indígena Aripuanã apresentou atividade de água e umidade inferiores, e dimensões morfométricas superiores tanto para as castanhas inteiras quanto para as amêndoas, quando comparado ao lote do território indígena Juara. Além disso, esse lote também apresentou nas amêndoas maior teor de lipídios (com perfil mais oleico) e proteínas totais. Castanhas com maior teor lipídico são mais valorizadas por apresentarem melhor rendimento em processos industriais de extração de óleo via prensagem mecânica.

Essas diferenças entre lotes foram também evidenciadas na variação da força necessária para ruptura da casca nas mesmas faixas de atividade de água dos ensaios de isotermas de sorção, onde as cascas das castanhas de Juara romperam sob forças mais elevadas que às de Aripuanã. Dessa forma, considerar a origem geográfica e o perfil do material são parâmetros-chaves para a elaboração de estratégias mais eficazes de beneficiamento, contribuindo para a redução de perdas por quebra da amêndoa, otimização do processo industrial e aumento da qualidade final do produto.

Além disso, observou-se que os diferentes níveis de atividade de água aos quais as castanhas foram expostas, tanto nos processos de dessorção quanto de adsorção, foram capazes de provocar modificações perceptíveis no aspecto físico, principalmente das amêndoas, que é a fração de interesse comercial. De forma geral, níveis mais elevados de atividade de água tanto na dessorção quanto na adsorção, estiveram associados a um escurecimento mais pronunciado da amêndoa, o que pode comprometer a aparência do produto, influenciar negativamente a aceitação pelo consumidor e reduzir seu valor de mercado, evidenciando a importância do monitoramento da umidade e atividade de água desse material tanto no processo de secagem quanto no armazenamento do material seco.

Outro aspecto relevante desta pesquisa foi o ajuste de modelos matemáticos semiempíricos aos dados experimentais de sorção, o que possibilitou a caracterização do comportamento higroscópico do material em função da atividade de água. Foi possível determinar que as isotermas possuem padrão sigmoidal tipo II, e o teor de umidade da monocamada (x_m), parâmetro essencial para o estabelecimento de limites seguros de umidade durante o armazenamento, foi de 5 ± 1 g H₂O/100 g b.s. para castanhas do lote Juara e $3,6 \pm 0,2$ g H₂O/100 g b.s. para castanhas de Aripuanã, valores estes, próximos às umidades de equilíbrio determinadas na secagem.

A Análise de Componentes Principais (PCA) corroborou os achados das análises, evidenciando padrões consistentes de diferenciação entre os lotes e entre as condições higroscópicas avaliadas. Em todas as análises, tanto para os ensaios de dessorção (60 °C) quanto de adsorção (25 °C), os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram mais de 80 % da variância total dos dados, demonstrando elevada representatividade do modelo.

Durante o processo de secagem em condição não estacionária, conduzido em sistema de ar quente a 60 °C, ambos os lotes de castanha-do-brasil (Juara e Aripuanã) apresentaram comportamento similar, atingindo a umidade de equilíbrio (5 ± 1 g/ 100 g b.s. para Juara, e $3,9 \pm 0,4$ g/ 100 g b.s. para Aripuanã) em um tempo total de 16 horas. O uso de modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de secagem revelou que o modelo de Page apresentou o melhor desempenho entre os avaliados. Do ponto de vista da cinética de remoção de água sob fluxo contínuo de ar quente, os dois materiais responderam de forma equivalente ao tratamento térmico. No entanto, apesar dessa semelhança na dinâmica de secagem, não é recomendado que os lotes sejam beneficiados conjuntamente, visto que em faixas de atividade de água similares durante o processo de dessorção e adsorção, as castanhas do lote Aripuanã romperam sob aplicação de forças significativamente menores do que as castanhas do lote Juara.

Essa diferença indica uma maior fragilidade estrutural do material de Aripuanã em determinadas condições higroscópicas, o que pode comprometer a integridade física do produto se submetido às mesmas etapas de beneficiamento mecânico. Por outro lado, as castanhas de Aripuanã

podem apresentar maior facilidade de descascamento, evitando que o material passe por excessivos ciclos dentro do descascador, que é uma prática observada na cooperativa.

Por fim, a avaliação da contração volumétrica mostrou que, embora o lote Aripuanã tenha apresentado volumes iniciais e finais significativamente superiores aos de Juara, a redução relativa de volume durante a secagem foi semelhante em ambos (cerca de 20-22%). Esse achado indica que, proporcionalmente, os lotes respondem de forma comparável à desidratação até umidade de equilíbrio, reforçando a consistência dos resultados de cinética de secagem. Entretanto, o maior volume final mantido por Aripuanã possui implicações práticas: pode representar vantagem em termos de valor visual e comercial quando o produto é vendido por unidade, mas também implica maior ocupação volumétrica em embalagens e armazenamento, aumentando custos logísticos. Tais resultados reforçam a importância de controlar adequadamente a umidade e as condições higroscópicas durante o processamento, não apenas para preservar a integridade física, mas também para assegurar sua estabilidade microbiológica, qualidade visual e comercial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1993). Análise sensorial de alimentos e bebidas – NBR 12806. Rio de Janeiro: ABNT.
- Airaksinen, S. (2005). Role of Excipients in Moisture Sorption and Physical Stability of Solid Pharmaceutical Formulations. PhD thesis, Dissertationes bioscientiarum molecularium Universitatis Helsingiensis in Viikki, Helsinki, Finland.
- Alcântara, S. R., Almeida, F. de A. C.; Silva, F. L. H. da; Gomes, J. P. (2009). Isotermas de adsorção do pedúnculo seco do caju. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.1, p.81-87.
- Almeida, C.P. (1963). Castanha-do-pará: sua utilização e importância na economia amazônica. Ed. S/A, Ministério da Agricultura, Serviço de Informação Agrícola, Rio de Janeiro.
- Almeida, J. J. (2015). Do extrativismo à domesticação: as possibilidades da Castanha do Pará. Tese (Doutorado em História Econômica). Universidade de São Paulo. 304 p.
- Al-Muhtaseb, A. H.; Mcminn, W. A. M.; Magee, T. R. A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. *Trans IChemE*, v. 80.
- Al-Muhtaseb, A. H.; Mcminn, W. A. M.; Magee, T. R. A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders. Part I: Mathematical description of experimental data. *J Food Eng.*
- Alves, T. P.; Nicoletti, J. F. (2016). Influência das variáveis de processo sobre a secagem osmo-convectiva de pimentão verde. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*. 10, n. 1, p. 2022-2037. Ponta Grossa.

- Andrade, E. H. A.; Maia, J. G. S.; Streich, R.; Marx F. (1999). Studies of Edible Amazonian Plants. Part 3. Seed composition of Amazonian Lecythidaceae species. *Journal of Food Composition and Analysis* n. 12, p 37–51.
- ANVISA. Resolução RDC nº 270, de 22 de setembro de 2005. (2005). Regulamento Técnico para Óleos Vegetais, Gorduras Vegetais e Creme Vegetal. *Diário Oficial da União*, Brasília.
- AOCS - American Oil Chemists' Society. (2009). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society. 6. ed. Press: Champaign.
- AOCS - Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemist's Society. (1998). Champaign: Illinois, 5th ed.
- Apata, J. E. M.; Edgar, J.; Quintero, C.; Albeiro, O.; Porras, B.; Danilo, L. (2014). Sorption isotherms for oat flakes (*Avena sativa* L.) *Agronomia Colombiana*, v. 32, p. 52-58.
- Araújo, J. M. A. (2015). *Química de Alimentos*. 6 Ed. Editora FGV.
- Balbi, M. E.; Penteado, P. T. P. Da.; Cardoso, G.; Sobral, M. G.; Souza, V. R. de. (2014). Castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa* bonpl.): composição química e sua importância para saúde. *Visão Acadêmica*, Curitiba, v.15, n.2.
- Bao, T. et al. (2022). Green alternative methods for pretreatment of whole jujube before the drying process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 102, n. 3, p. 1030–1039.
- Barroncas, J. S. (2020). A secagem no processamento da castanha-do-Brasil castanha-do-brasil como ferramenta de prevenção da contaminação por aflatoxinas. Universidade Federal do Amazonas.

- Bell, L. N.; Labuza, T. P. (2000). *Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use*. 2nd ed. St. Paul: American Association of Cereal Chemists.
- Beuchat, L. R. (1978). Relationship of water activity to moisture content in tree nuts. *Journal of Food Science (Wiley-Blackwell)*, Vol 43, Issue 3, p754.
- Bitencourt, M. A. F. (2020). Isotermas de dessecção, secagem e caracterização nutricional das amêndoas das castanha-do-brasilcastanha-do-brasil da região amazônica. Dissertação (em Tecnologia de Alimentos) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde.
- Blahovec, J. (2004). Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. *Journal of Food Engineering*, v.65, p.489-495.
- Botelho, F. M. et al. (2018). Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 26, n. 1, p. 13-25.
- Botelho, F. M.; Boschioli Neto, N. J.; Botelho, S. C. C.; Oliveira, G. H. H.; Hauth, M. R. (2019). Sorption isotherms of Brazil nuts. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 10, p. 776-781.
- Bourne, M. C. (1987). Effects of water activity on textural properties of food. In: Rockland, L. B.; Beuchat, L. R. *Water Activity: Theory and Applications to Food*. New York, Marcel Dekker Inc., p.75-99.
- Bourne, M. C. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. Academic Press.
- BRASIL. Instrução Normativa Ibd/Br Nº 1/80 de 11 de Abril de 1980. (1980). Disponível em:<legnet.com.br/integra/cliente-1/pais-1/UN808.HTM>. Acesso em: 20 de mar de 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. (2020). Desafios e oportunidades da cadeia da castanha-do-Brasilcastanha-do-brasil são temas de workshops virtuais. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/desafios-e-oportunidades-da-cadeiaa-castanha-do-brasilcastanha-do-brasil-sao-temas-de-workshops-virtuais>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2010). Gabinete Do Ministro - Instrução Normativa Nº 11. Disponível em:<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtosvegetal/normativos-dipov/IN11.pdf>.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Decreto lei n. 51.209 de 1961. (1961). Decreto que determina a alteração da denominação de “castanha-do-pará” para “Castanha-do-BrasilCastanha-do-brasil”. Diário Oficial. Brasília, DF. Março de 1961.

Brett B.; Figueroa, M.; Sandoval, A. J.; Barreiro J. A. (2009). Moisture sorption characteristics of starchy products: oat flour and rice flour. *Food Biophys* 4:151–157.

Brunauer, S., Deming, L.S., Deming, W.E., Teller, E. (1940). On a theory of Van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*, v.62, p.1723-1732.

Brunauer, S.; Emmet, T.H.; Teller, F. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.*, v. 60, n. 2, p. 309-319.

CAC/RPC. (2005). Code of practice for the prevention and reduction of aflatoxin contamination in tree nuts. *Codex Alimentarius*.

Camargo, F. F. (2010). Etnoconhecimento e variabilidade morfológica de castanha-do-brasilcastanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.:

Lecythidaceae) em área da Amazônia Matogrossense. Dissertação, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá-MT.

Camargo, P. B. de; Salomão, R. de P.; Trumbore, S.; Martinelli, L. A. (1994). How old are large Brazil-nut trees (*Bertholletia excelsa*) in the Amazon? *Scientia Agricola*, v. 51, n. 2, p. 389-391.

Camicia, R. G. M. et al. (2015). Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. *Revista Caatinga*, v. 28, p. 206-214.

Cardoso, B. R.; Duarte, G. B. S.; Reis, B. Z.; Cozzolino, S. M. F. (2017). Brazil nuts: nutritional composition, health benefits and safety aspects. *Food Research International*, v. 100, part 2, p. 9-18.

Carneiro, A. P. G., Fonteles, T. V., Costa, M. G. M., De Freitas Felipe Rocha, É. M., Rodrigues, M. D. C. P. (2011). Parâmetros de textura em barras de chocolate ao leite. *Brazilian Journal of Food & Nutrition Alimentos e Nutrição*, 22(2).

Carvalho, I. M. M.; Queiroz, J. H.; Brito, L. F.; Toledo, R. C. L.; Souza, A. L. (2012). O consumo de castanhas pode reduzir o risco de processos inflamatórios e doenças crônicas. *Enciclopédia Biosfera*, v. 8, n. 15, p. 1977-1996.

Cassini, A. S., Marczak, L. D. F.; Noreña, C. P. Z. (2006). Water adsorption isotherms of texturized soy protein. *Journal of Food Science*, v. 77, n.1, p.194-199.

Castro, D. A. (2017). Repartição de nutrientes e selênio na castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*). 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia e Zootecnia) apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso.

Cecchi, H. M. (2003). Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos. 2. ed. Campinas: editora da Unicamp, p.207.

- Celestino, S. M. C. (2010). Princípios de Secagem de Alimentos. Planaltina: Embrapa Cerrados.
- Chen, L.; Opara, U. L. (2013). Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods – A review. *Journal of Food Engineering*, v. 119, p. 497-507.
- Chisté, R. C.; Lopes, A. S.; Pena, R. da S. (2012). Isoterma de adsorção de umidade da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*). *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 06, n. 01: p. 671-679.
- Chowdhury, M. M. I.; Huda, M. D.; Hossain, M. A.; Hassan, M.S. (2006). Moisture sorption isotherms for mungbean (*Vigna radiata* L). *Journal of Food Engineering*, 74(4), pp.462-467.
- Chung, D. S.; Pfost, H. (1967). Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. *Transactions of the ASAE*, v.10, p.549-554.
- Chunhieng, T.; Hafidi, A.; Pioch, D.; Brochier, J.; Montel, D. (2008). Detailed Study of Brasil Nut (*Bertholletia excelsa*) Oil Micro-Compounds: Phospholipids, Tocopherols and Sterols. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 19, n. 7, p. 1374-1380.
- COOPAVAM. (2024). História. Coopavam, s.d. Disponível em: <<https://coopavam.org.br/historia/>>. Acesso em: 20 de fev de 2024.
- Corrêa, M. P. (1931). Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, v. 2, p. 129-131.
- Corrêa, P. C.; Martins, D. S. R.; Melo, E. C. (1995). Umigrãos: Programa para o cálculo do teor de umidade de equilíbrio para os principais produtos agrícolas. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem.

- Corrêa, P. C.; Martins, J. H.; Christ, D.; Mantovani, B. H. M. (1998). Curvas de dessecamento e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca (*Zea mays*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 75-79.
- Corrêa, P. C.; Reis, M. F. T.; Oliveira, G. H. H.; Oliveira, A. P. L.; Botelho F. M. (2015). Moisture desorption isotherms of cucumber seeds: modeling and thermodynamic properties. *Journal of Seed Science*, Londrina, v. 37, n. 3, p. 218-225.
- Costanza, R.; D'arge, R.; De Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R. V.; Paruelo, J.; Raskin, R. G.; Sutton, P.; Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, v. 387, n. 6630, p. 253-260.
- Couto, M. L. B. G. (2015). Estudo do Processo de secagem de frutos do cerrado em secador de bandejas com circulação forçada de ar. Trabalho de Conclusão de Curso (Química Tecnológica). Universidade de Brasília – UnB. Brasília – DF.
- Cozzolino, S. M. (2001). Novas recomendações de nutrientes interpretação e utilização. In: Usos e aplicações das “Dietary Reference Intake”. DRIS. São Paulo: ILSI/SBAN.
- D'arcy, R. L.; Watt, I. C. (1970). Analysis of sorption isotherms of nonhomogeneous sorbents. *Transaction Faraday Society*.
- Damodaran, S.; Parkin, K. L. (2019). *Química de alimentos de Fennema*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed.
- Damodaran, S.; Parkin, K. L.; Fennema, O. R. (2010). *Química de Alimentos de Fennema*. 4 ed., Artmed, Porto Alegre, 900 p.
- Doymaz, I.; Pala, M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, v.60, p. 125-130, 2003.

- Draper, N. R.; Smith, H. (1998). Applied regression analysis. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 712 p.
- FAOSTAT. (2023). Production Quantity of Brazil nuts, with shell. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 21 de janeiro de 2024.
- Fellows, P. J. (2006). Tecnologia do processamento de Alimentos: Princípios e Prática. 2ed. Porto Alegre: Artmed.
- Fernandes F. (2016). Potencialidades e limites da cadeia de valor da -do-brasil (*Bertholletia excelsa*) no município de Manicoré, sul do Amazonas. Disponível em: https://www.fundovale.org/wpcontent/uploads/2017/10/6_castanha_manicoe.pdf.
- Ferreira, C. D.; Pena, R. S. (2003). Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*). Revista Ciência e Tecnologia dos alimentos, Campinas - SP, v. 37, n. 2, p. 251-255.
- Ferreira, E.S.; Silveira, C.S.; Lucien, V.G.; Amaral, A.S. (2006). Physico-chemical characterization of almond cake and fatty acid composition of the majority of the crude oil-nut Brazil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.). Food and Nutrition, v. 17, n. 2, p. 203- 208.
- Ferreira, V. L. P. (2000). et al. Análise sensorial: testes discriminativos e afetivos. Campinas: SBCTA.
- FIB – Food Ingredients Brasil. (2016). Desidratação: a desidratação na conservação dos alimentos. Revista Food Ingredients Brasil, n. 38, p. 64-71.
- Flora Do Brasil. (2024). *Bertholletia* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB23424>>. Acesso em: 25 fev.

- Foust, A. S.; Wenzel, L. A.; Clump, C. W.; Maus, L.; Andersen, L. B. (1982). Princípios das operações unitárias. 2a ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Franco, G. (2003). Tabela de composição química dos alimentos, 9. ed. São Paulo: Editora Atheneu.
- Freitas, J. B.; Naves, M. M. V. (2010). Composição química de nozes e sementes comestíveis e sua relação com a saúde. Rev. Nutr., Campinas, 23(2):269-279, mar./abr.
- Freitas, S. P.; Freitas-Silva, O.; Miranda, I. C.; Coelho, M. A. S. (2007). Extração e fracionamento simultâneo de óleo da castanha-do-brasil com etanol. Ciência Tecnologia de Alimentos, 27, p. 14-17.
- Gabas, A. L.; Telis-Romero, J.; Giraldo-Gómez, G. I.; Telis, V. R. N. (2009). Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo com encapsulantes. Ciências e Tecnologia de Alimentos, v.29, p.911-918.
- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. 3ª Edición, México: CECSA.
- Gonçalves, E. C. B. A. (2015). Análises de alimentos - uma visão química da Nutrição. 4 ed, 338 p. São Paulo.
- Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal of Research of the National Bureau of Standards A. Physics and Chemistry, 81 (1): 89-96.
- Guedes, A. C. L.; Silva, M. F. da. (2012). Produtos florestais não madeireiros: uso sustentável de açaí, andiroba, castanha e cipó-titica. Embrapa Amapá.
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. Journal of Chemical Physics, v.16, n.10, p.931-937.

- Hartman, L.; Lago, R. C. (1973). Rapid preparation of fatty acid methyl esters from lipids. *Laboratory practice*, 22(6), 475–476.
- Harkins, W.D.; Jura, G. J. (1943). An adsorption method for the determination of the area of a solid without the assumption of a molecular area, and the area occupied by nitrogen molecules on the surfaces of solids. *The Journal of Chemical Physics*, 11 (9) 431-432.
- Helfman, Rd. R.; Hartel, R. W. (2000). *Principles os Food Processing*. Chapman & Hall, p.1-218.
- Henderson, S. M. A. (1952). basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, v.33, n.1, p.29-32.
- Hii, C.L; Jangam, S.V.; Ongand, S.P.; Mujumdar, A.S. (2012). *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations* Singapore: National University of Singapore Press, 150p.
- Homma, A. K. O.; Menezes, A. J. E. A. (2014). *Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação*. Brasília: Embrapa.
- Humboldt, F. W. H. A. Von.; Bonpland, A. J. A. (1808). *Plantes équinoxiales recueillies au Mexique: dans l'île de Cuba, dans les provinces de Caracas, de Cumana et de Barcelone, aux Andes de la Nouvelle Grenade, de Quito et du Pérou, et sur les bords du rio-Negro de Orénoque et de la rivière des Amazones*. Paris: F. Schoell, p. 122-127.
- IAL - Instituto Adolfo Lutz. (2008). *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. IV ed. 1a ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). *Produção de castanha-do-Pará*. Disponível

em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-do-para/br>. Acesso em: 27 jan. 2024.

Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1982). Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components. Academic Press.

Iglesias, H. A.; Chirife, J. (1976). Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. Journal of Food Technology, 11(2), 109-116.

INC - International Nut and Dried Fruit Council. (2022). Nuts & Dried Fruits Statistical Yearbook 2021/2022. Disponível em: <https://inc.nutfruit.org/inc-releases-2021-2022-statistical-yearbook/> (Acesso em: 14 de março de 2024).

INICIATIVA AMAZÔNIA +10. (2023). Disponível em: <https://www.amazoniamaisdez.org.br/iniciativa>. Acesso em: 10 mar. 2024.

Kainer, K. A., Malvasi, M. M.; Duryea, M. L.; Silva, E. R. (1999). Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) seed characteristics, preimbition and germination. Seed Science and technology v 271, p. 731-745.

Kaminski, W.; Kudra, T. (2000). Equilibrium moisture relations for food and biomaterials. In: Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Enfield (NH) USA: Ed. Arum S. Mujumdar, Science Pulishers.

Kaya, S.; Kahyaoglu, T. (2007). Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon. Journal of Food Engineering, 78, 413–421.

Kluczkovski, A. M.; Scussel, V. M. (2015). Gerenciamento de risco da castanha-do-Brasilcastanha-do-brasil. Nova Letra: Manaus.

- Kuhn, I. (1967). Generalized potential theory of adsorption. *Journal of Colloid Interface Science*, v.23, p.563.
- Labuza, T. P. (1968). Sorption phenomena in foods. *Food Technology*, v. 22, n.3, p.263-272.
- Labuza, T. P.; Kaanane, A.; Chen, J. Y. (1985). Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, v. 50, p. 385–391.
- Labuza, T. P.; Tannembaum, S. R.; Karel, M. (1970). Water content and stability of low moisture and intermediate-moisture foods. *Food Technology*, p. 543-550.
- Labuza, T.P. (1975). Sorption phenomena in foods: theoretical and practical aspects. In: *Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials* p. 197, 1975.
- Labuza, T.P.; Altunakar, L. (2008). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. In: BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. et al (Ed). *Water activity in foods: Fundamentals and Applications*. Local: Oxford. Blackwell Publishing.
- Lang, K. W.; Steinberg, M. P. (1981). Linearization of the water sorptions isotherm for homogeneous ingredients over a_w 0,30-0,95. *Journal of Food Science*, v. 46, p. 1450-1452.
- Larrea-Alcázar, D. M.; Villanueva, G.; Poma, A.; Zenteno-Ruiz, F. S.; Araujo-Murakami, A.; Altamirano, S.; Ugarte, C. de. (2018). The Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl., Lecythidaceae) in Bolivia: geographical distribution and deforestation impacts 2010-2015. *Ecología en Bolivia* 53(1): p. 16-30.

- Letaief, H. (2007). Application of chemical-physical and mechanical tests for the definition of wine grape quality. Tese de Doutorado, University of Turin, Itália.
- Leung, H. K. (1981). Structure and Properties of water. *Cereal Foods World*, v. 26, n. 7, p. 350-352.
- Li, R.; Carpenter, J. A.; Cheney, R. (1998). Sensory and instrumental properties of smoked sausage made with mechanically separated poultry (MSP) meat wheat protein. *Journal of Food Science*, 63(5), p. 923–929.
- Lima R. M. (2007). Ensaio de determinação de área superficial por adsorção de gás. In: *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro, Cetem/MCT. p. 450-470.
- Llavata, B. et al. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current Opinion in Food Science*, v. 35, p. 20-26.
- Lopes, B. O. (2021). *Castanhas da Amazônia: composição nutricional e benefícios para a saúde*. Instituto de Tecnologia: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Paracambi, RJ.
- Madamba, P. S.; Driscoll, R. H.; Buckle, K. A. (2007). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering* v.29, p. 75-97.
- Marques, E.R. (2006). Alterações químicas, sensoriais e microscópicas do café cereja descascado em função da taxa de remoção de água. 2006. 85 p. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Alimentos. Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Mathlouthi, M.; Rogé, B. (2003). Water vapor sorption isotherms and the caking of food powders. *Food Chem.* Jul; 82 (1): 61-71.

- Mcguire, R. G. (1992). Reporting of objective color measurements. *Hort Science*, 27:1254-1255.
- Melo Filho, A. B.; Vasconcelos, M. A. S. (2011). *Química de Alimentos*. Recife: UFRPE, 78p.
- Mesquita, C. M.; Rezende, J. E.; Carvalho, J. S.; Fabri Júnior, M. A.; Moraes, N. C.; Dias, P. T. Carvalho. R. M.; Araújo, W. G. (2016). *Manual do café: colheita e preparo (Coffea arábica L.)*. 52 p. il. EMATER-MG. Belo Horizonte.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. (2008). Instrução Normativa nº 6, de 23 de setembro de 2008. Espécies da flora brasileira ameaçadas de extinção e com deficiência de dados, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 24 set. Seção 1, p. 75-83.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. (2017). *Castanha-do-brasil: Boas Práticas Para o Extrativismo sustentável orgânico*, 1ª Edição. Brasília.
- Mohapatra, D.; Rao, P. S. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v. 66, n. 4, p. 513-518.
- Monisha, C.; Loganathan, M. (2022). Impact of drying methods on the physicochemical properties and nutritional composition of defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 46, n. 1, p. e16184, 1 jan. 2022.
- Moraes, M.L.B de. (2000). *Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz*. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) -UFPEL.
- Moreira, M. F. P. (2000). *Secagem de Gel Agar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). São Paulo: Universidade Federal de São Carlos.

- Moritz, A. (1984). Estudos biológicos da floração e frutificação da castanha-do-brasil castanha-do-brasil. EMBRAPA-CPATU. Belém.
- Mujumdar, A. S. (1995). Handbook of Industrial Drying. 2 ed., v. 1, Marcel Dekker Inc., 742 p.
- Mulet, A. et al. (1999). Sorption Isothermic Heat Determination by Thermal Analysis and Sorption Isotherms. Journal of Food Science, v. 64, p. 64-68.
- Mulet, A.; Garca-Pascual, P.; Sanjuan, N.; Garca-Reverter, J. (2002). Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). Journal of food engineering, essex, v. 53, n. 1, p. 75-81.
- Müller, C. H. A. (1995). cultura da castanha-do-brasil castanha-do-brasil. Brasília: EMBRAPA-SPI. 65 p. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Oriental. Coleção Plantar, 23.
- Müller, C. H. (1981). Castanha-do-brasil Castanha-do-brasil; estudos agronômicos. EMBRAPA-CPATU. Belém.
- Myers, G. P.; Newton, A. C.; Melgarejo, O. (2000). The influence of canopy gap size on natural regeneration of brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia. Forest Ecology and Management, v. 127, p. 199-128.
- Nascimento, W. M. O. Do; Carvalho, J. E. U. de. (2022). *Bertholletia excelsa*: Castanha-do-Brasil Castanha-do-brasil. In: CORADIN, L.; CAMILLO, J.; VIEIRA, I. C. G. (ed.). Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Norte. Brasília, DF: MMA.
- Neto, V. Q. et al. (2009). Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H.B.K) seed kernel oil: characterizations and thermal stability. Revista de Biologia e Farmácia, João Pessoa, v. 03, n 01, p. 33-42.

- Nguyen, T. A., Verboven, P., Daudin, J. D., Nicolaï, B. M. (2004). Measurement and modelling of water sorption isotherms of 'Conference' pear flesh tissue in the high humidity range. *Postharvest Biology and Technology*, v. 33, p. 229-241, 2004.
- Nicolas, J. J.; Richard-Forget, F. C.; Goupy, M. J.; et al. (1994). Enzymatic browning reactions in apple and apple products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v.34, n.2, p.109-157.
- OCA - Observatório Castanha-da-Amazônia. (2023). A Castanha-da-Amazônia: aspectos econômicos e mercadológicos da cadeia de valor – Brasília, DF: Mil Folhas do IEB.
- Oliveira, E. G. de. (2006). Secagem de *Spirulina platensis*: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada. Dissertação. Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos.
- Oliveira, S. M. et al. (2015). Effect of Air-Drying Temperature on the Quality and Bioactive Characteristics of Dried Galega Kale (*Brassica oleracea* L. var. Acephala). *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 39, n. 6, p. 2485-2496.
- Ordóñez, J. A. (2005). *Tecnologia de alimentos*. Porto Alegre: Artmed, p. 66-69.
- Orhevba, B., Chukwu, O., Osunde, Z. D., & Ogwuagwu, V. (2013). Influence of moisture content on the yield of mechanically expressed neem seed kernel oil. *International Journal of Science and Research*, 2(3), p. 965-977.
- Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life III - The isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65, p.419-421.

- Park, K. J.; Antonio, G. C.; Oliveira, R. A.; Park, K. J. B. (2006). Seleção de processos e equipamentos de secagem. CONBEA, Universidade Estadual de Campinas, SP.
- PAS. (2004). Manual de segurança e qualidade para a cultura da castanha-do-brasil. Brasília, DF, 62p. (Série Qualidade e Segurança dos alimentos).
- Peleg, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, v.16, p.21-37.
- Pereda, J. A. O.; Rodríguez, M. I. C.; Álvarez, L. F.; Sanz, M. L. G.; Minguillón, G. D. G. F.; Perales, L. H.; Cortecero, M. D. S. (2005). *Tecnología dos alimentos: componentes dos alimentos processados*. Porto Alegre: Artmed, v. 1, 294p.
- Phuon, V. et al. (2021). Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 45(7), e13794.
- Prance, G. T.; Mori, S. S. (1979). *Lecythidacear*. *Flora Neotropica*, v. 21, n.1, p 1-270.
- Rizvi, S. S. H. (2005). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. *Engineering properties of foods*. 3. ed. New York: CRC Press. p. 239-326.
- Rolle, L.; Siret, R.; Río Segade, S.; Maury, C.; Gerbi, V.; Jourjon, F. (2012). Instrumental texture analysis parameters as markers of table-grape and winegrape quality: A review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 63, p. 11-28.
- Sahin, S.; Sumnu, S. G. (2006). *Physical Properties of Foods*. Springer Science & Business Media.

- Salas-Salvadó, J.; Casas-Agustench, P.; Murphy, M. M.; López-Uriarte, P.; Bulló, M. (2008). The Effect of Nuts on Inflammation. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*.
- Salinas, R. D. (2002). *Alimentos e Nutrição Introdução a Bromatologia*. 3.ed. Porto Alegre: ARTMED, 278p.
- Salomão, R. De P.; Rosa N. A.; Castilho, A.; Morais, K. A. C. (2006). Castanheira-do-brasil recuperando áreas degradadas e provendo alimento e renda para comunidades da Amazônia Setentrional. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais*, v. 1, n. 2, p. 65-78.
- Salomão, R. P. (1991). Estrutura e densidade de *Bertholletia excelsa* H & B ("Castanheira") nas regiões de Carajás e Marabá, estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 7: p. 47-68.
- Salomão, R. P.; Rosa, N. A.; Nepstad, D. C.; Bakk, A. (1995). Estrutura populacional e breve caracterização ecológica/econômica de 108 espécies arbóreas da floresta Amazônica Brasileira – I. *Interciência*, v. 20, n. 1, p. 20-29.
- Santana, A. C.; D'ávila, J. L.; Alencar, M. I. R.; Mattar, P. N.; Souza, R. F.; Costa, R. M. Q. (1997). *Reestruturação produtiva e desenvolvimento na Amazônia: condicionantes e perspectivas*. Belém: BASA; FCAP, 185p.
- Santana, A. C.; Santana, A. L.; Gomes, S. C.; Salomão, R. P. (2015). Valoração dos danos ambientais causados por hidrelétricas para a produção de energia na bacia do Tapajós. *Reflexões Econômicas*, v. 1, n. 1, p. 31-48.
- Santos, A. L.; Kunrath, N. F.; Souza, I. S.; Carvalho, C. E. G. (2015). Avaliação físico-química do óleo residual da castanha-do-brasil castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H. B. K.) e sua conversão em biodiesel. *Revista Enciclopédia Brasileira*, v. 11, n. 22, p. 3550-3561.

- Santos, J. U. M.; Bastos, M. N. C.; Gurgel, E. S. C.; Carvalho, A. C. M. (2006). *Bertholletia excelsa* Humboldt & Bonpland (Lecythidaceae): aspectos morfológicos do fruto, da semente e da plântula. *Boletim do Museu Paraense Emílio Ciências Naturais*.
- Santos, O. V. et al. (2013). Comparative parameters of the nutritional contribution and functional claims of Brazil nut kernels, oil and defatted cake. *Food Research International* 51, p. 841-84.
- Santos, O. V. et al. (2013). Yield, nutritional quality, and thermal-oxidative stability of Brazil nut oil (*Bertholletia excelsa* H.B.K) obtained by supercritical extraction. *Journal of Food Engineering*.
- Santos, V. S. (2008). Desenvolvimento de barras de alto teor protéico a partir da castanha-do-Brasil castanha-do-brasil. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Sarantópoulos, C. I. G. L.; Oliveira, L. M.; Canavesi, E. (2001). Requisitos de conservação de alimentos em embalagens flexíveis. Campinas: CETEA/ITAL.
- Sato, A.; Yamada, M. (2003). Berry texture of table, wine, and dual-purpose grape cultivars quantified. *Hort Science*, v. 38, p. 578-581.
- Silva Júnior, E. C.; Wadt, L. O.; Silva, K. E.; Lima, R. M. B.; Batista, K. D.; Guedes, M. C.; Carvalho, G. S.; Carvalho, T. S.; Reis, A. R.; Lopes, G.; Guimarães, G. L. R. (2017). Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. *CHEMOSPHERE*, v. 188, p. 650-658.
- Da Silva, F. A.; Marsaioli Junior, A. (2004). Estudo comparativo da conservação de castanha-do-Brasil castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) seca por microondas e convencionalmente. *Boletim Do Centro De Pesquisa De Processamento De Alimentos*, vol. 22, nº 2, p. 387-404.

- Silva, H. W.; Costa, L. M.; Resende, O.; Oliveira, D. E. C.; Soares, R. S.; Vale, L. S. R. (2015). Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 8, p. 780-784.
- Silva, O. S.; Tassi, E. M. M.; Pascoal, G. B. (2016). *Ciência dos alimentos: princípios de bromatologia*. 1. ed. 248 p.
- Singh, K. P.; Mishra, H. N.; Saha, S. (2011). Sorption isotherms of barnyard millet grain and kernel. *Food and Bioprocess Technology*, 4, p. 788-796.
- Smith, N. J. H.; Williams, J. T.; Plucknett, D. L.; Talbot, J. P. (1992). *Tropical forests and their crops*. New York: Cornell University, 568 p.
- Smith, O. B. (1974). *Extrusion Cooking*. In: Altschul, A.M. (Editor). *New Protein Foods*. New York: Academic Press..
- Souza, J. M. L. (2013). *Caracterização e efeitos do armazenamento de amêndoas com películas e despelculadas sobre propriedades das frações proteica e lipídica de Castanha do Brasil*. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS.
- Souza, M. L.; Menezes, H. C. (2004). *Processamento de amêndoa e torta de castanha-do-brasil castanha-do-brasil e farinha de mandioca: parâmetros de qualidade*. *Ciência e tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 24, n. 01.
- Speiss, W. E. L. E Wolf, W. F. (1987). The result of the cost 90 project on water activity *Physical Properties of Foods*, p. 65-91.
- Strunz, C. C.; Oliveira, T. V.; Vinagre, J. C. M.; Lima, A.; Cozzolino, S.; Maranhão, R. C. (2008). Brazil nut ingestion increased plasma selenium but had minimal effects on lipids, apolipoprotein, and high-density lipoprotein function in human subjects. *Nutrition Research*. v.28, n.3, p.151-155.

- Szczesniak, A. S. (1987). Review paper: Correlating sensory with instrumental texture measurements – An overview of recente developments. *Journal Texture Studies*, v. 18, p. 1-15.
- Szczesniak, A. S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13(4), p. 215-225.
- TACO - Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. (2011). Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. 4. ed. Campinas: NEPA-UNICAMP, 161p.
- Talla, A.; Jannot, Y.; Nkeng, G. E.; Puiggali. (2005). Experimental determination and modelling of sorption isotherms of tropical fruits: banana, mango and pineapple. *Dry Technology*, p. 1477-1498.
- Teixeira, V. G.; Coutinho, F. M. B. E Gomes, A. S. (2001). Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno, *Química Nova*, 24(6): p. 808-818.
- Thys, R. et al. (2010). Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. *Journal of Food Engineering*, c. 199, p. 468-473.
- Timmermann, E. O.; Chirife, J.; Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, v. 48, p. 19-31.
- Valenzuela, A. B.; Nieto, S. K. (2003). Ácidos grasos omega-6 y ômega-3 en la nutrición perinatal: su importância em el desarrollo del sistema nervioso y visual. *Revista Chilena de Pediatría*, v. 74 n. 2.
- Van Den Berg, C. (1985). Development of B.E.T. like models for sorption of water of foods, theory and relevance. In: D. Simatos & J. L. Multon (Eds.), *Properties of Water in Foods in Relation to Quality and Stability*, p. 119-135.

- Van Den Berg, C.; Bruin, S. (1981). Water activity and its estimations in food systems: theoretical aspects. In: ROCHLAND, L. B.; STEWART, G. F. *Water Activity: Influences on Food Quality*. New York: Academic Press, p. 1-61.
- Vaz Pereira, I. C., Costa, S. L. L. (1981). *Bibliografia de Castanha-do-brasil (Bertholletia excelsa HBK)*. Brasília, EMBRAPA.
- VENKATACHALAM, M.; SATHE, S. K. Chemical composition of selected edible nut seeds. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, v, 54, n. 13, p. 4705-4714, 2006.
- Wadt, L. H. De O.; Kainer, K. A. (2009). *Domesticação e melhoramento: espécies amazônicas*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa.
- Wadt, L. H. De O.; Marocco, J. F.; Guedes, M. C.; Silva, K. E. Da S. (2023). *Castanha-da-amazônia: estudos sobre a espécie e sua cadeia de valor: aspectos sociais, econômicos e organizacionais*. v. 1, Brasília, DF: Embrapa.
- Wolf, W.; Spiess, W. E. L.; Jung, G. (1985). Properties of water in foods in relation to food quality and stability. In: Stamatos D.; Multon J. L, editors. *Standardization of isotherm measurement*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, p. 661-679.
- Yang, J. (2009). Brazil nuts and associated health benefits: A review. *LWT - Food Science and Technology*, v. 42, n. 10, p.1573-1580.
- Yanniots, S.; Blahovec, J. (2009). Model analysis of sorption isotherms. *LWT – Food Science and Technology*, v. 42, n. 10, p. 1688-1695.
- Yazdani, M.; Sazandehchi, P.; Azizi, M.; Ghobadi, P. (2006). Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio. *Eur. Food Res. Technol.* P. 577-584.

Zuidema, P. A. (2003). Ecology and management of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*), PROMAB (Programa Manejo de Bosques de la Amazonia Boliviana) Scientific Series 6. PROMAB, Riberalta. 118 p.

Zuidema, P. A.; Boot, R. G. A. (2002). Demography of the Brasil nut tree (*Bertholletia excelsaal*) in the Bolivian Amazon: impact of seed extraction on recruitment and population dynamics. *Journal of Tropical Ecology*, v. 18, p. 1-31.