

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

EDUARDA OLIVEIRA RODRIGUES

ESTUDO DA SECAGEM DO ENDOCARPO DA CASTANHA-DO-BRASIL
(Bertholletia excelsa)

MANAUS

2023

EDUARDA OLIVEIRA RODRIGUES

ESTUDO DA SECAGEM DO ENDOCARPO DA CASTANHA-DO-BRASIL
(Bertholletia excelsa)

**Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Química da
Escola Superior de Tecnologia da
Universidade do Estado do Amazonas,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.**

Orientador: Profa. Dra. Kiki Pinheiro Melo Braga

MANAUS

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

R696ee Rodrigues, Eduarda Oliveira
Estudo da Secagem do Endocarpo da Castanha-do-
Brasil (*Bertholletia excelsa*) / Eduarda Oliveira Rodrigues.
Manaus : [s.n], 2023.
54 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.
Inclui bibliografia
Orientador: Braga, Kiki Pinheiro Melo

1. castanha-do-Brasil. 2. endocarpo. 3. secagem.
4. DCCR. 5. aflatoxinas. I. Braga, Kiki Pinheiro Melo
(Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III.
Estudo da Secagem do Endocarpo da Castanha-do-Brasil
(*Bertholletia excelsa*)

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

EDUARDA OLIVEIRA RODRIGUES

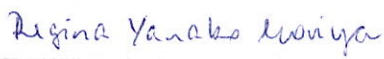
ESTUDO DA SECAGEM DO ENDOCARPO DA CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*)

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Química da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

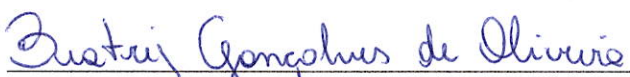
Banca Examinadora:



Prof. Dra. Kiki Pinheiro Melo Braga – Orientador



Prof. Dra Regina Yanako Moriya - UEA



Eng. Quím. Beatriz Gonçalves de Oliveira – Jabil Ltda.

Conceito: Aprovado

Manaus, 20 de março de 2023

DEDICATÓRIA

À minha mãe que deu todo o suporte necessário para que eu pudesse realizar essa conquista. Ao meu avô (*in memoriam*) que tinha muito orgulho do caminho que decidi seguir e a todos que contribuíram de alguma forma para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe por todos os sacrifícios realizados para me proporcionar o melhor, pelo incentivo e afeto durante toda a minha trajetória, sempre colocando os meus estudos como prioridade.

À minha tia Erika, segunda mãe, que sempre me apoiou e acreditou em mim.

À toda minha família por sempre depositarem confiança em mim, mas principalmente ao meu avô Bento (*in memorian*), por torcer pelas minhas vitórias e ter tanto orgulho de mim.

Ao meu noivo, Igor, por todo o suporte, confiança e compreensão no decorrer dessa caminhada.

Aos meus amigos Kennedy, Thayná e Amaury pela parceria ao longo do curso, por se mostrarem sempre prestativos e prontos a ajudar, além de todo os ensinamentos, momentos de descontração e dos desafios que passamos juntos.

Aos colegas Gabriel, Fernando, Vinicius, Yago e Yves que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho pudesse ser realizado dando todo o suporte necessário.

Ao seu Marco e seu Raimundo que me deram suporte para conseguir o material para realização desse trabalho.

À minha orientadora Profa. Dra. Kiki Braga por ter aceitado o desafio, pela melhor orientação possível e pelos ensinamentos durante todo o curso.

Ao prof. Sérgio Duvoisin por ter disponibilizado o laboratório para que esse trabalho pudesse ser realizado.

A todos os professores do curso de Engenharia Química pelos ensinamentos, sempre contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

A castanha-do-Brasil está presente principalmente na região norte do país, fazendo parte da cadeia produtiva da região, tendo como principais problemas o surgimento de aflatoxinas quando não beneficiadas de forma correta e os resíduos que são gerados em abundância sem aproveitamento. Através da secagem é possível minimizar o crescimento dos microrganismos em materiais orgânicos e dar valor agregado a muitos resíduos. Devido a isso, o presente trabalho teve como objetivo a caracterização e estudo da cinética de secagem do endocarpo da castanha-do-Brasil, analisando a influência que a temperatura e a carga de material possuem em relação à umidade final do material através do delineamento composto central rotacional (DCCR). Os experimentos foram realizados em uma estufa de circulação de ar forçada, com a temperatura variando entre 47,93°C e 62°C e com a carga de material variando entre 79 g e 220g. Com o estudo foi possível observar nas curvas de secagem e na análise estatística, a influência que a carga de material e temperatura lineares possuem frente à umidade final do endocarpo da castanha, com a carga de material possuindo um efeito positivo e a temperatura um efeito negativo sobre a umidade final, porém com a carga de material possuindo uma influência maior. Com isto, obteve-se a menor umidade final, de 0,42%, operando com a menor carga de material (79,29 g) na temperatura de 55°C. Para se obter a menor umidade final, deve-se haver uma combinação de menor carga de material e uma maior temperatura.

Palavras-chave: castanha-do-Brasil, endocarpo, secagem, DCCR, aflatoxinas.

ABSTRACT

Brazil nuts are mainly present in the northern region of the country, being part of the production chain in the region, with the main problems being the appearance of aflatoxins when not processed correctly and the waste that is generated in abundance without being used. Through drying it is possible to minimize the growth of microorganisms in organic materials and add value to many residues. Because of this, the present work aimed to characterize and study the drying kinetics of the Brazil nut endocarp, analyzing the influence that temperature and material load have on the final moisture of the material through the composite design rotational center (DCCR). The experiments were carried out in a forced air circulation oven, with the temperature varying between 47.93°C and 62°C and with the material load varying between 79 g and 220 g. With the study it was possible to observe in the drying curves and in the statistical analysis, the influence that the load of material and linear temperature have on the final moisture of the chestnut endocarp, with the load of material having a positive effect and the temperature a negative effect on final moisture, but with material loading having a greater influence. With this, the lowest final humidity was obtained, of 0.42%, operating with the lowest material load (79.29 g) at a temperature of 55°C. To obtain the lowest final moisture, there must be a combination of lower material load and higher temperature.

Keywords: Brazil nut, endocarp, drying, DCCR, aflatoxins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Castanheira (<i>Bertholletia excelsa</i>)	14
Figura 2 - Ouriço da castanheira-do-Brasil	15
Figura 3 - Castanha-do-Brasil.....	16
Figura 4 - Castanhais nativos na Amazônia	17
Figura 5 - Variação anual do valor de produção dos principais produtos não madeireiros do extrativismo	18
Figura 6 - Esquema da secagem por convecção	27
Figura 7 - Estufa de circulação forçada	28
Figura 8 - Secador tipo túnel	28
Figura 9 - Curva típica do processo de secagem	29
Figura 10 - Curva típica de taxa de secagem.....	30
Figura 11 - Fluxograma do processo de secagem do endocarpo da castanha-do-Brasil	33
Figura 12 - Cascas da castanha-do-Brasil.....	33
Figura 13 – Moinho de facas e agitador de peneiras	34
Figura 14 - Bandeja, estufa de circulação de ar forçada e balança analítica	37
Figura 15 - Casca da castanha-do-Brasil de granulometria Tyler 16	38
Figura 16 - Curva de cinética de secagem a 55°C para 79,29 g, 100 g e 220 g de casca.....	40
Figura 17 - Curva de cinética de secagem a 50°C com 100 g e 200 g de casca.....	40
Figura 18 - Curva de cinética de secagem a 60°C com 100 g e 200 g de casca.....	41
Figura 19 - Curva de cinética de secagem a 55°C e 79,29 g de casca.....	41
Figura 20 - Curva de cinética de secagem com 150 g a 62°C, 55°C e 47,93°C.....	42
Figura 21 - Curva de cinética de secagem com 100 g a 50°C e 60°C.....	42
Figura 22 - Curva de cinética de secagem com 200 g a 50°C e 60°C.....	43
Figura 23 - Diagrama de pareto	44
Figura 24 - Superfície de resposta para umidade final em função das variáveis operacionais (temperatura e massa) e gradiente de contorno	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Utilização dos produtos e subprodutos da castanha-do-Brasil.....	20
Tabela 2 - Limites máximos para concentração das aflatoxinas no Brasil.....	22
Tabela 3 - Diferenças entre as operações secagem e evaporação.....	22
Tabela 4 - Resultados de estudos realizados com resíduos e amêndoas da castanha-do-Brasil	24
Tabela 4 - Resultados de estudos realizados com resíduos e amêndoas da castanha-do-Brasil (Continuação)	25
Tabela 5 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica	34
Tabela 6 - Matriz de experimentos utilizando o DCCR	35
Tabela 7 - Variáveis de entrada e seus níveis para o planejamento fatorial 2 ²	36
Tabela 8 - Massas retidas após agitação das peneiras	38
Tabela 9 - Determinação da massa de sólido seco	39
Tabela 10 - Umidade final após cinética de secagem.....	39
Tabela 11 - Análise de variância para a variável de resposta umidade final.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C	Graus celsius
A	Área de transferência de massa, m ²
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
aw	Atividade de água
b.s	Base seca
b.u	Base úmida
Ca	Cálcio
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
g	Grama
H ₂ O	Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
m	Massa
mss	Massa de sólido seco
m _{ui}	Massa úmida inicial
m _{ut}	Massa úmida com o tempo
N	Taxa de evaporação, kg.min ⁻¹
P	Fósforo
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
Se	Selênio
T	Temperatura
UR	Umidade relativa
X _{bs}	Umidade em base seca
X _{bu}	Umidade em base úmida
X _E	Umidade de equilíbrio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	CASTANHEIRA-DO-BRASIL (<i>Bertholletia excelsa</i>)	14
2.1.1	Fruto da Castanheira	15
2.2	EXTRATIVISMO E ASPECTOS ECONÔMICOS DA CASTANHA-DO-BRASIL... ..	16
2.3	RESÍDUOS DA CASTANHA-DO-BRASIL	19
2.4	CONTAMINAÇÃO POR MICOTOXINAS	20
2.5	SECAGEM.....	22
2.5.1	Tipos de Secagem	25
2.5.1.1	Secagem Natural	25
2.5.1.2	Secagem Artificial	26
2.5.1.3	Secagem Contínua	26
2.5.1.4	Secagem Intermitente	26
2.5.1.5	Secagem Estacionária	26
2.5.2	Secagem Convectiva	27
2.5.3	Curvas de Secagem ou Cinética de Secagem	29
2.6	PLANEJAMENTO FATORIAL	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	OBTENÇÃO E PRÉ-TRATAMENTO	33
3.2	PLANEJAMENTO FATORIAL	35
3.3	CINÉTICA DE SECAGEM.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	ANÁLISE GRANULOMÉTICA.....	38
4.2	CINÉTICA DE SECAGEM	39
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	43
5	CONCLUSÃO	46
6	PERSPECTIVAS	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) está presente em diversos países da América do Sul, incluindo o Brasil, em que a região norte é a responsável pela maior parte da produção nacional do fruto produzido por essa espécie. Fornece matérias-primas tanto para a indústria alimentícia quanto para a indústria madeireira. (SIMÕES, 2004; SILVA; PONTES; ALBUQUERQUE, 2020)

O fruto, chamado comumente de castanha-do-Brasil ou castanha-do-Pará, é formado por diversas camadas. A primeira delas é o ouriço, ou pericarpo, que são cápsulas globosas, quase de formato esférico, em que na parte interna se encontram as castanhas. Em cada ouriço, é encontrado em torno de 8 a 24 castanhas. As castanhas são formadas pela casca, chamada de endocarpo, por uma película, denominada testae e a amêndoa, que é parte comestível da castanha-do-Brasil, possuindo o maior valor econômico e de interesse das indústrias de alimentos e cosméticos por possuir um alto valor nutricional (CARDOSO et al., 2017; NOGUEIRA et al., 2014). Devido ao alto valor nutricional, é importante realizar estudos na área de pós-colheita do fruto para que suas propriedades sejam mantidas.

Um dos grandes problemas que afetam a cadeia produtiva da castanha-do-Brasil é o surgimento de fungos produtores de aflatoxinas, toxinas que são prejudiciais à saúde humana e de animais, devido aos efeitos tóxicos que são causados após 6h de ingestão, efeitos imunossupressores, mutagênicos e carcinogênicos. A contaminação pode ocorrer em diversas etapas, como na colheita, armazenamento ou até mesmo no processamento. As condições favoráveis para o crescimento desses micro-organismos estão relacionadas com o teor de água, temperatura e aeração do fruto (MASSI et al., 2014). Então, dentre os processos destinados a evitar o surgimento desses micro-organismos, encontra-se a operação unitária chamada secagem.

A secagem em alimentos tem como objetivo a redução da umidade encontrada no material, fazendo com que minimize a atividade de enzimas e micro-organismos, e conseqüentemente, aumente a vida de prateleira do alimento, mantendo suas propriedades físicas e químicas por um período maior, além de contribuir para a facilidade do transporte e comercialização. (ZEMPULSKI; ZEMPULSKI, 2007)

Outro problema encontrado no extrativismo da castanha-do-Brasil, são os resíduos desperdiçados. Como a maior parte de interesse está nas amêndoas, tem-se cerca de 90% de resíduos gerados, sem a devida aplicabilidade e que promovem um impacto ambiental (BOUVIE

et al., 2016). Com isso, é de suma importância realizar estudos voltados para identificar as possíveis aplicações desses resíduos, e dessa forma, agregar valor as partes do fruto que normalmente são desperdiçadas e trazer diversos benefícios ambientais. (SOUZA E TRINDADE, 2015)

Atualmente, são poucos os estudos destinados à aplicação da casca ou endocarpo da castanha-do-Brasil, que é uma fonte residuária abundante na região Amazônica, principalmente quando se trata de sua secagem. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo geral o estudo da secagem do endocarpo da castanha-do-Brasil, tendo os seguintes objetivos específicos:

- Obter as curvas de cinética de secagem da castanha-do-Brasil em diferentes cargas de material e temperatura de secagem;
- Determinar a influência da carga de material e temperatura na umidade final do material por meio da DCCR (delineamento composto central rotacional);
- Realizar a caracterização físico-química do endocarpo da castanha-do-Brasil através da análise granulométrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CASTANHEIRA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*)

A castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*), pertencente à família Lecythidaceae, com cerca de 300 espécies distribuídas em 25 gêneros, entre os quais 150 espécies e 10 gêneros são encontradas no Brasil (NASCIMENTO et al., 2010), é uma árvore encontrada na América do Sul mundialmente conhecida por produzir as chamadas castanhas-do-Brasil, estando presente na região amazônica e fornecendo matérias-primas para a indústria alimentícia e madeireira. (SILVA, 2021)

Conhecida também como castanha-do-Pará, é encontrada em áreas de terra firme e não inundáveis da região amazônica e em diversos países, como Brasil, Peru, Colômbia, Venezuela e Equador (SIMÕES, 2004). Suas árvores são de grande porte, podendo ultrapassar os 60 m de altura e mais de 4 m de diâmetro na base do tronco (BARBOSA, 2021). Suas folhas contêm lâminas foliares longas com comprimento de 17 cm a 36 cm e com largura de 6 cm a 15 cm. Já as flores, possuem coloração branca com um aroma agradável, ocorrendo a frutificação entre dezembro e maio (CARVALHO, 2014). Na Figura 1 tem-se um exemplo da castanheira.

Figura 1 - Castanheira (*Bertholletia excelsa*)



Fonte: DIJIGOW (2021)

2.1.1 Fruto da Castanheira

A castanheira possui apenas um ciclo por ano, com o início da sua fase reprodutiva entre os meses de outubro a dezembro, alcançando a atividade plena de janeiro a fevereiro. Considerando-se então 10 meses para a sua frutificação (TONINI, 2011). Com 8 anos, a castanheira tem o seu estabelecimento no campo, e o seu fruto inicia a sua produção. Os seus frutos são denominados ouriços, sendo produzidos cerca de 30 por árvore a cada ciclo (COSTA et al., 2009). Os ouriços (Figura 2), também chamados de pericarpo, são cápsulas globosas quase de forma esférica, com casca espessa, lenhosa, dura e de coloração castanha, que não se abre de forma espontânea. (SOUZA E WADT, 2016)

Figura 2 - Ouriço da castanheira-do-Brasil



(A) Ouriço; (B) Vestígio do cálice da flor; (C) Casca; (D) Diâmetro; (E) Castanhas

Fonte: BITENCOURT et al. (2020).

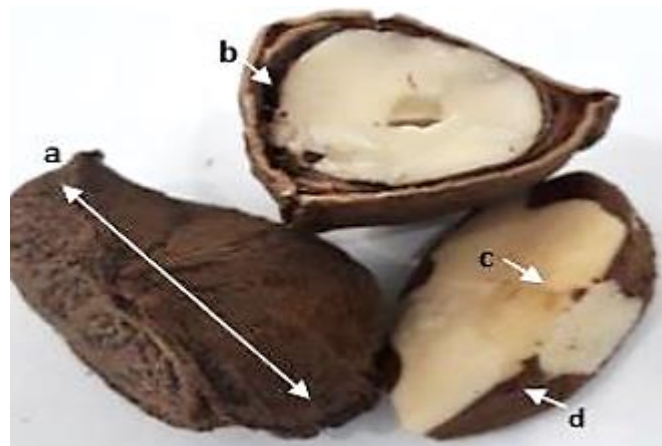
O ouriço, com diâmetro em torno de 10 a 15cm, pesa de 0,5 a 2,5kg, contendo em seu interior de 8 a 24 castanhas (CARDOSO et al., 2017), com forma geralmente angulosa, constituídas por uma casca e uma amêndoa, que é a parte comestível, possuindo um alto valor nutricional, o que faz agregar valor comercial. A castanha tem uma forma triangular, com um comprimento em torno de 3,5 a 5cm, aproximadamente 2cm de largura e pesando entre 4 e 10g, cada uma. (MELO, 2000)

A castanha (Figura 3) é formada por diversas camadas, como a casca, também chamada de endocarpo lenhoso, a película, denominada testa e a amêndoa. Segundo Santos et al. (2006), o fruto da castanheira é:

Uma cápsula poricida simples, indeiscente, orbicular, subgloboso e levemente achatada, é ligado a planta por um pedúnculo com retículos transversais. O epicarpo de cor castanho-

escuro, lenticelas estouradas, fibroso e com 0,993 cm de espessura; o mesocarpo apresenta cor castanho claro, mais espesso que o epicarpo, também fibroso e com 2,422 cm; endocarpo castanho escuro semelhante ao epicarpo, rugoso, cartáceo levemente fibroso e septado com funículo lenhoso. A semente é estenospermica, triangular angulosa com base, margem e ápice anguloso, constituída por duas camadas de tegumento, a testa, mais externa possui cor castanho claro opaca, rugosa e lígnea; a camada interna, tégmem é membranoso mais escuro que a testae, rafe rígida e saliente. (SANTOS et al., 2006)

Figura 3 - Castanha-do-Brasil



(A) Castanha; (B) Endocarpo Lenhoso; (C) Amêndoa; (D) Película (testae)

Fonte: BITENCOURT et al. (2020).

As amêndoas da castanha-do-Brasil despertam o interesse das indústrias alimentícias e de cosméticos, pelo seu alto valor nutricional. Por conta disso, há muitos estudos com o objetivo de melhorar o pós-colheita da castanha, para que suas propriedades físicas sejam mantidas, através do desenvolvimento dos equipamentos utilizados na aeração, secagem, armazenamento e transporte. (NOGUEIRA et al., 2014)

A castanha-do-Brasil é rica em lipídeos e proteínas, possuindo cerca de 60 a 70% de lipídeos e de 15 a 20% de proteínas. Além disso, possui em sua composição vitaminas, como a tiamina e a riboflavina e minerais, como Ca, P e Se, lhe conferindo propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e anticancerígeno. (CARDARELLI E OLIVEIRA, 2000)

2.2 EXTRATIVISMO E ASPECTOS ECONÔMICOS DA CASTANHA-DO-BRASIL

O extrativismo é uma atividade, que até a chegada dos colonizadores na região amazônica, tinha como função básica alimentar e atender as necessidades de subsistência dos povos nativos que aqui viviam (SILVA, et al., 2019). A castanheira é cultivada na região há mais de 11 mil anos

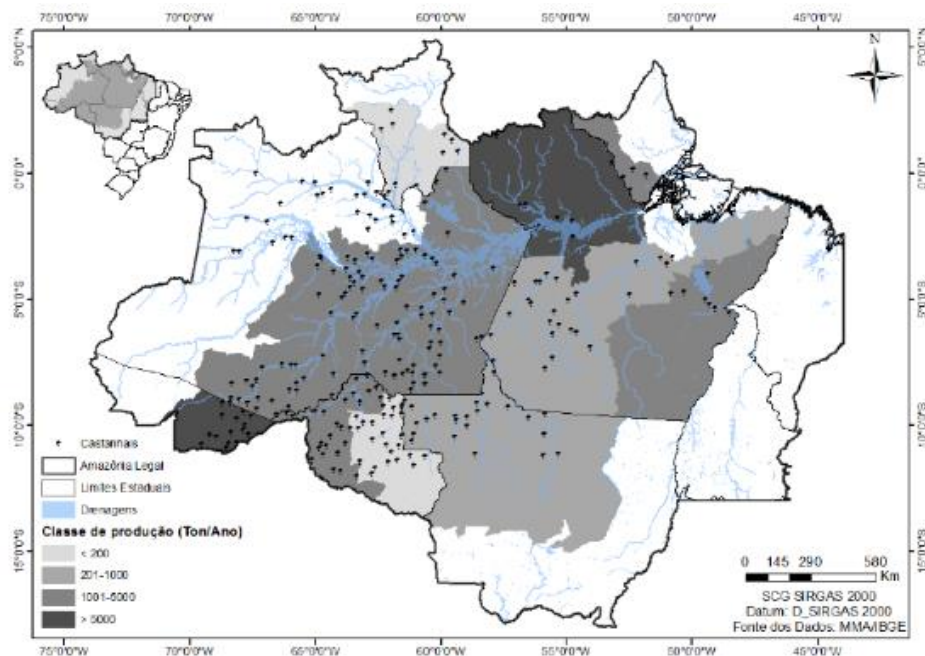
segundo estudos arque botânicos, passando a ser o principal produto oriundo do extrativismo a partir de 1920. (SILVA; PONTES; ALBUQUERQUE, 2020)

A prática do extrativismo é realizada em sua maioria pelos povos e comunidades da Amazônia que exploram não somente esse, mas outros produtos naturais. A castanha possui uma grande procura, principalmente para o consumo *in natura*, ganhando cada vez mais relevância tanto no mercado nacional como no internacional (SANTANA et al., 2017). O mercado nacional e internacional cada vez mais melhora e se encontra em constante expansão devido ao surgimento das agroindústrias, que se tornaram especializadas nestes produtos. (BAYMA et al., 2014)

A castanha-do-Brasil possui uma grande versatilidade no mercado nacional e internacional, por poder ser consumida *in natura* ou através da produção de óleos, leite e farinha com alto valor nutricional, além do uso na indústria de cosméticos. (SANTANA et al., 2017; SILVA; PONTES; ALBUQUERQUE, 2020)

Os líderes na produção e exportação mundial da castanha-do-brasil são o Brasil, Peru e Bolívia (BATISTA et al., 2019; WADT et al., 2018). Em 2016 a castanha-do-brasil ficou em terceiro lugar em relação ao volume produzido na Amazônia Legal, sendo produzido aproximadamente 37 mil toneladas, sendo os principais produtores os castanhais nativos da região Norte, conforme observado na Figura 4. (IBGE, 2016)

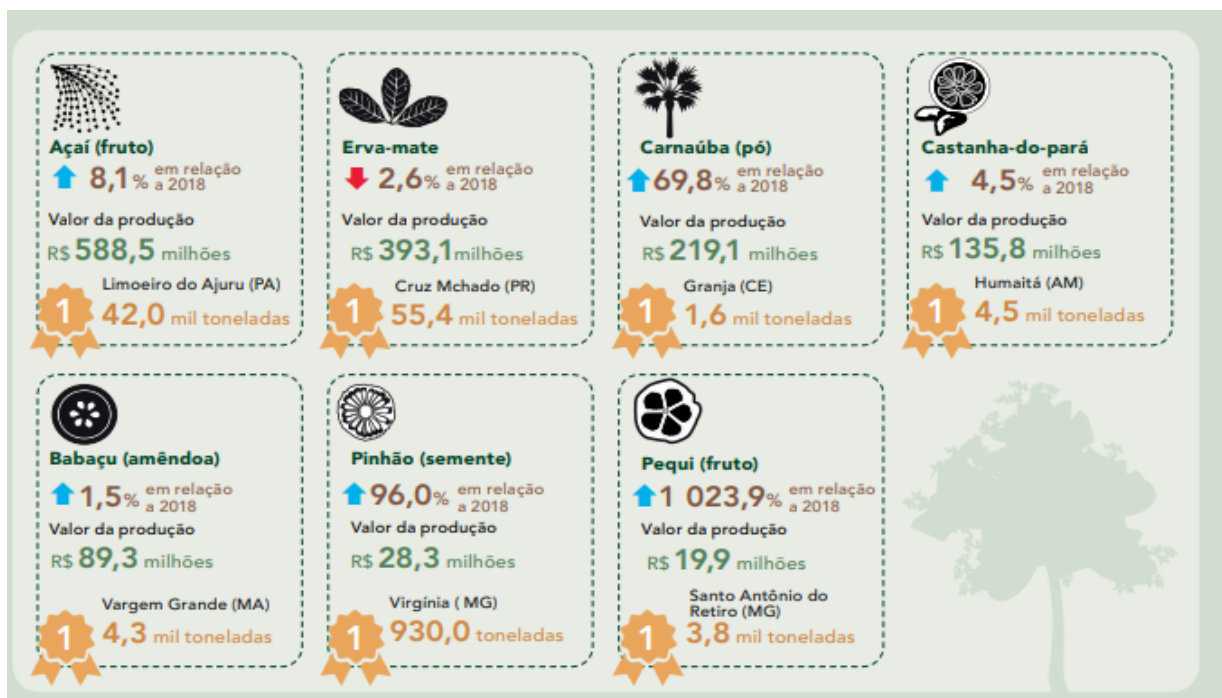
Figura 4 - Castanhais nativos na Amazônia



Fonte: SILVA; PONTES; ALBUQUERQUE (2020).

Segundo o IBGE (2019), em 2019 a castanha-do-brasil apresentou uma retração em relação ao ano de 2018, atingindo uma produção de 32,9 mil toneladas, um volume 3,7% menor. Porém, mesmo com uma quantidade menor, o valor de produção alcançado foi maior, totalizando R\$ 135,8 milhões. O Amazonas é o estado na liderança da produção nacional, produzindo cerca de 12,2 mil toneladas por ano. Destes, 13,7% do total do volume produzido no país é produzido no município de Humaitá. A variação anual do valor de produção da castanha-do-brasil é mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Variação anual do valor de produção dos principais produtos não madeireiros do extrativismo



Fonte: IBGE (2019).

De acordo com Almeida (2015), o Brasil enfrentou concorrência da Bolívia, que assumiu o posto de maior exportadora do produto nas últimas décadas, mas o Brasil vem recuperando o espaço a partir da exploração de novos mercados com o constante aumento da demanda interna, além do apoio e incentivo à produção. (TOLEDO et al., 2016)

Hoje em dia, a castanha-do-Brasil é comercializada tanto no atacado quanto no varejo, por saca ou quilograma, beneficiada ou com casca (endocarpo). Em 2015 o Brasil exportou cerca de US\$ 41,56 milhões em castanha-do-brasil. (FORMIGONI, 2018)

2.3 RESÍDUOS DA CASTANHA-DO-BRASIL

A forte atividade agrícola desenvolvida no país gera uma alta quantidade de resíduos agroindustriais fazendo com que a utilização da biomassa ganhe destaque no Brasil. Muitos estudos vêm sendo feitos, havendo um destaque para os que buscam uma solução para a problemática da diminuição da quantidade de resíduos de biomassa. Assim, diversas pesquisas têm analisado a possível aplicação dos resíduos como fonte de energia renovável e na produção de carvão ativado. (COUTO et al., 2004)

Como muitas cidades da região Amazônica baseiam suas atividades econômicas na agricultura, fruticultura e extrativismo, frutas como açaí, cupuaçu e a castanha-do-Brasil geram uma grande quantidade de resíduos que poderiam ser aproveitados, sendo grande parte desperdiçada, e poderiam gerar renda para as próprias comunidades que se beneficiam dessas atividades. Uma das formas de aproveitamento seria a geração de energia para as cidades do interior, que muitas das vezes nem possuem acesso ao sistema de energia elétrica nacional. (SOUZA E TRINDADE, 2015)

A biomassa residual que se destaca como potencial energético, é a castanha-do-Brasil (COSTA et al., 2009). Como geralmente, somente as amêndoas são utilizadas no comércio por serem comestíveis, o restante do fruto, composto de ouriço (parte externa) e cascas da castanha ou endocarpo, de onde se tira as amêndoas (parte interna); forma cerca de 90% dos resíduos (BOUVIE et al., 2016). O fruto da castanha-do-Brasil pesa cerca de 2,4 kg, no qual cerca de 1/3 do seu peso é formado pelas sementes. Portanto, para cada fruto que é coletado, tem-se, aproximadamente 1,6kg de resíduo e para cada tonelada de amêndoas da castanha-do-Brasil que são processadas, há cerca de 1,4 toneladas de resíduos (BOUVIE et al., 2016; DIAS et al., 2012; OLIVEIRA E LOBO, 2002).

No processamento industrial, a produção de resíduos é bem maior, devido ao fruto estar dentro do ouriço, além do descarte das cascas e da película da amêndoa (SANTOS, 2008; SANTOS et al., 2010; YANG, 2009). Segundo o IBGE (2016), em 2015, a produção no Brasil de castanha-do-brasil atingiu cerca de 40.643 toneladas, produzindo aproximadamente 4.889,35 toneladas de cascas. Devido a isso, uma grande quantidade de resíduos é gerada a partir do extrativismo da castanha e por isso a importância de procurar dar uma finalidade a esses resíduos (ANJOS et al., 2017). A utilização dos produtos e subprodutos da castanha-do-Brasil são observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Utilização dos produtos e subprodutos da castanha-do-Brasil

Constituintes	Usos
Amêndoas	Indústria de alimentos devido a seu elevado valor nutricional; Elaboração de produtos e subprodutos.
Ouriço	Medicina doméstica, artesanato e adubos.
Casca	Potencial de utilização como adubo, além de servir como carvão vegetal e para a produção de carvão ativado.

Fonte: ALMEIDA (2015); KORNEXL (1999).

A produção de carvão ativado é uma outra forma de aplicação para que os resíduos da castanha-do-Brasil sejam aproveitados, pois é um produto que possui um grande poder de adsorção, podendo ser utilizado na recuperação de produtos químicos, eliminação de compostos orgânicos e metais, eliminação de contaminantes em meio aquoso, suporte para catalisadores, até mesmo em sistemas de tratamento de efluentes, entre outros. (REZA et al., 2020)

Dessa forma, o aproveitamento de resíduos agroindustriais para a obtenção do carvão ativado é extremamente importante, já que este material agrega valor a uma parte do fruto, que normalmente é desperdiçada. Além também de gerar um impacto ambiental, pois a adsorção traz diversos benefícios ambientais em muitos processos industriais. (SOUZA E SILVA, 2021)

2.4 CONTAMINAÇÃO POR MICOTOXINAS

O desenvolvimento tecnológico na cadeia produtiva da castanha-do-Brasil é muito baixo devido à uma divisão científica que existe entre o extrativismo e o cultivo do fruto. Como muitas pesquisas estão direcionadas para a domesticação e o desenvolvimento da planta, os recursos técnicos da cadeia produtiva continuam restritos, com o manejo, boas práticas e ferramentas considerados arcaicos, além da manipulação do fruto não ser adequada, o que favorece a contaminação por micro-organismos. (ALMEIDA, 2015)

A comercialização da castanha-do-Brasil pode ser atingida pelo aparecimento de fungos produtores de aflatoxinas, grupo de compostos tóxicos produzidos por certas cepas de fungos, com a contaminação podendo ocorrer em diversas etapas, como na colheita, armazenamento ou até mesmo no processamento (MASSI et al., 2014). Como a castanha é um fruto tropical, a contaminação por aflatoxinas se torna fácil devido ao seu hospedeiro estar suscetível nessas regiões. (FREITAS-SILVA E VENÂNCIO, 2011)

A aflatoxina é produzida pelos fungos *Aspergillus flavus* e *Aspergillus parasiticus*, podendo ocorrer a contaminação tanto em castanhas processadas quanto em não processadas. Esses fungos são conhecidos como micotoxinas, que quando presentes na castanha, podem causar prejuízos econômicos para a indústria e efeitos tóxicos em seres humanos e animais. (KLUCZKOVSKI, 2019)

As condições favoráveis para a proliferação das micotoxinas estão relacionadas ao teor de água, temperatura e aeração do fruto (ÁLVARES et al., 2011). Dentre os metabólitos tóxicos para os seres humanos e animais, produzidos pelas micotoxinas, são destacados quatro tipos de aflatoxinas: B1, B2, G1 e G2. Ademais, as micotoxinas também possuem propriedades consideradas cancerígenas. O limite de aflatoxinas para o consumo humano é de $20 \mu\text{g kg}^{-1}$ (FELIX et al., 2018). Portanto, é necessário que haja as boas práticas de manejo com o intuito de prevenir e assegurar a qualidade da castanha-do-Brasil, impedindo a contaminação dos produtos por micotoxinas.

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) determinou alguns critérios e procedimentos higiênico-sanitários tanto da castanha-do-Brasil quanto dos seus subprodutos através da Instrução Normativa 11 de 22 de março de 2010, para que a segurança alimentar seja garantida (BRASIL 2010). Dessa forma, ocorre o controle de aflatoxinas nas castanhas, devendo conter menos de $4 \mu\text{g kg}^{-1}$, recomendando-se realizar o armazenamento a uma temperatura de 30°C por até 60 dias, com um teor de água para castanha-do-Brasil de 4,57% (b.u.) e para as amêndoas de 4,50% (b.u.), com a atividade de água não ultrapassando o valor de 0,7, pois a partir disso, ocorre o crescimento dos micro-organismos. A redução da atividade de água é possibilitada por meio da secagem, a partir da diminuição do teor de água. (ARRUS et al., 2005; BORÉM, 2008)

Os limites máximos de concentração de aflatoxinas no Brasil são estabelecidos pela Resolução RDC n° 07 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) de 18 de fevereiro de 2011, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites máximos para concentração das aflatoxinas no Brasil

Alimento	Micotoxina	Limite
Castanha-do-Brasil para consumo direto (comercializada com casca)	Aflatoxinas B1, B2, G1, G2	20,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (20 ppb)
Amêndoa da Castanha-do-Brasil para consumo direto (comercializada sem casca)	Aflatoxinas B1, B2, G1, G2	10,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (10 ppb)

Fonte: MINISTÉRIO DA SAÚDE - ANVISA (2011).

2.5 SECAGEM

Apesar de haver uma grande variedade de produtos agrícolas no Brasil, a quantidade de perda pós-colheita é bem grande. Dessa forma, se torna necessário o uso de métodos que aumentem a conservação dos alimentos que são bastante perecíveis (ALVES et al., 2010). Dentre os métodos empregados, a secagem é uma das técnicas mais utilizadas. (VISHWANATHAN et al., 2010)

A secagem é uma operação unitária definida como a transferência de um líquido presente em um sólido úmido (na superfície e em poros) para uma fase gasosa não saturada, ou de forma mais simples, é a remoção de água ou qualquer outro líquido de um material (ZEMPULSKI; ZEMPULSKI, 2007). Outra operação com um conceito semelhante a esse é o da evaporação, em que há a concentração de soluções líquidas (CELESTINO, 2010). As diferenças entre essas duas operações são mostradas abaixo na Tabela 3.

Tabela 3 - Diferenças entre as operações secagem e evaporação

Secagem	Evaporação
Remoção de umidade de um material sólido.	Remoção de umidade de uma solução líquida.
Remoção de umidade por centrifugação ou por vaporização.	Remoção do líquido por uma vaporização.
A evaporação ocorre em uma temperatura inferior à temperatura de ebulição do líquido que se quer retirar do material sólido.	A vaporização ocorre na temperatura que se quer retirar da solução líquida.

Fonte: CELESTINO (2010).

A secagem de alimentos, ou também chamada de desidratação, é o processo em que ocorre a aplicação de calor sob condições controladas para remover a maior parte da água contida no sólido através da evaporação, havendo uma diminuição das atividades enzimáticas e microbiológicas e a minimização das alterações físico-químicas, sendo o principal objetivo desta etapa, aumentar a vida de prateleira do produto a partir da redução da atividade de água (GURGEL,

2014; MARCINKOWSKI, 2006). Segundo Celestino (2010), algumas das vantagens da secagem é:

- Aumento da vida útil do produto;
- O alimento desidratado se mantém nutritivo. Mesmo com possíveis perdas de nutrientes, o valor nutricional do alimento se torna concentrado devido a remoção de água;
- Facilidade no transporte e comercialização, devido ao alimento seco ser mais leve e compacto com qualidade inalterada por um longo tempo;
- O processo de secagem é um processo econômico, além do custo de armazenagem dos produtos desidratados serem baixos;
- Diminuição das perdas pós-colheita.

O processo de secagem ocorre sob determinada condição de pressão de vapor do líquido presente no alimento for maior que a pressão parcial do vapor do mesmo líquido na fase gasosa. (DELMIRO, 2016)

Dois processos simultâneos são observados durante a secagem: a transferência de calor por meio da vaporização do líquido e a transferência de massa do líquido ou vapor presente no interior do alimento para a atmosfera na forma de vapor. Todavia o controle da secagem depende das condições internas de transferência de massa, das características do sólido ou das condições externas, como a temperatura e velocidade do gás de secagem. (JANGAM E MUJUMDAR, 2010)

A secagem pode ser realizada de duas formas: a natural e a artificial, sendo a natural, o processo em que a remoção de água é causada pela incidência da radiação solar, porém a dependência das condições climáticas se torna uma desvantagem para este modelo. Esta forma é utilizada na secagem de feijão, milho, trigo, café, entre outros alimentos. Já na secagem artificial, o processo é baseado na passagem de ar forçada através do material, à temperatura ambiente ou aquecido. Este método permite a redução rápida da umidade do material, evitando as alterações fisiológicas. (HALL, 1980; ZEMPULSKI; ZEMPULSKI, 2007)

Durante o processo de secagem, as características do ar de secagem influenciam significativamente no tempo da operação. Uma dessas características é a temperatura, pois uma maior temperatura aumenta a velocidade de secagem, diminuindo a umidade relativa e conseqüentemente aumentando a sua capacidade de se umedecer e aumentando a temperatura do material com a transferência de calor. (FERREIRA, 2004)

O aumento da temperatura tem como vantagem o aumento na velocidade de secagem, porém quando há o seu aumento indiscriminado, pode ocasionar danos ao material. Dependendo do tipo do produto a ser seco, há um limite de temperatura a ser utilizado para não interferir na sua integridade. No caso de produtos orgânicos recomenda-se a secagem em baixas temperatura para não haver a redução de nutrientes e alteração na cor e textura do produto. (FERREIRA, 2004)

Na Tabela 4 é possível observar alguns estudos realizados com a castanha-do-Brasil que envolvem o método da secagem em sua metodologia.

Tabela 4 - Resultados de estudos realizados com resíduos e amêndoas da castanha-do-Brasil

Autor e ano	Material Utilizado	Tratamento do Resíduo	Resultados
SOUZA E SILVA (2021)	Ouriço e cascas (endocarpo) da castanha-do-Brasil.	Os resíduos foram secos em estufa com circulação de ar a 105°C durante 2h. Em seguida, moídos com moinho de facas. Os grãos obtidos foram submetidos a classificação com o uso de peneira com abertura de 297 µm.	Utilização do ouriço e cascas das sementes da castanha na produção de adsorventes, obtendo-se umidade entre 8-9%, resultando em um rendimento do processo de carvão ativado próximo de 74%. O carvão ativado produzido com as cascas apontou um poder de adsorção maior comparado ao obtido a partir do ouriço. Ambos possuem um ótimo potencial energético.
MOREIRA (2021)	Endocarpo da castanha.	Lavagem da casca em água corrente, secagem em estufa de circulação de ar por 24h a 105°C, moagem em moinho de facas, peneiramento em jogo de peneiras de 0,05 mm a 1 mm e colocada para agitação por 30 min.	Concluiu-se que quanto menor a granulometria da partícula, maior a capacidade de adsorção do azul de metileno, apresentando 98,63% na capacidade de remoção. Assim, a casca da castanha-do-Brasil possui potencial para ser utilizada como adsorvente alternativo.
BITENCOURT et al (2020)	Amêndoas.	As amêndoas foram secas em estufa com ventilação de ar forçada nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80° C, na espessura entre 0,5 a 2cm.	A temperatura de secagem teve influência na qualidade nutricional e físico-química das amêndoas, sendo a temperatura de 60° C a que obteve melhores resultados em relação a esses parâmetros.

Tabela 5 - Resultados de estudos realizados com resíduos e amêndoas da castanha-do-Brasil
(Continuação)

GONÇALVES E CARVALHO (2019)	Casca da Castanha (endocarpo).	-	Utilização do endocarpo da castanha para a sintetização de carvão ativado, realizando estudos físico-químicos do índice de remoção de corantes, resultando em um processo eficiente com uma forte dependência do pH, temperatura e velocidade de rotação que a solução é submetida. Eficiência próxima de 80%.
MELO (2012)	Casca (endocarpo) da castanha.	A casca foi lavada em água corrente e seca em estufa com circulação de ar a 150° por 24h.	O carvão ativado foi produzido a partir da casca da castanha e utilizado na remoção de cobre (II) em um processo de adsorção em sistema batelada. Obteve-se um carvão ativado de baixo custo que apresentou uma eficiência de 90% na remoção do cobre (II), podendo ser utilizado no tratamento de efluentes.
NOGUEIRA (2011)	Castanhas.	As castanhas foram secas na estufa à 95°C por 6h.	Foi proposto um sistema de secagem por convecção natural, obtendo-se resultados satisfatórios, consideração o custo, facilidade de construção e operação. O carvão produzido possui alta qualidade tanto para o uso comercial quanto para o doméstico.

Fonte: PRÓPRIA

2.5.1 Tipos de Secagem

Há diversos tipos de secagem que são utilizadas dependendo do objetivo que se deseja alcançar e do material a ser seco. Cada um possui vantagens e desvantagens que serão vistas abaixo.

2.5.1.1 Secagem Natural

A secagem natural é uma secagem de baixo custo, que se aproveita da energia solar com o objetivo de reduzir a umidade de alimentos, principalmente, grãos, com o auxílio de materiais, como: lonas, terreiros de terra batida, cimentados e lajedos. A desvantagem dessa secagem é que ela depende das condições climáticas e a vantagem é que há uma menor incidência de grãos

trincados ou quebrados. É empregada para a secagem de produtos, como: café, cacau, milho, arroz e feijão. (CARVALHO E NAKAGAWA, 2000)

2.5.1.2 Secagem Artificial

Na secagem artificial ocorre a remoção de umidade do sólido de forma mais rápida. É baseada na passagem forçada de ar através do material a ser secado, à uma temperatura ambiente ou aquecido. (HALL, 1980)

Os métodos empregados nesse tipo de secagem ocorrem em diversas condições de temperatura e fluxo de ar, tempo e formas de movimentação dos produtos e do contato entre o ar e o produto. Dessa forma, existem diversos tipos de secadores artificiais de acordo com o princípio de operação. (BORGES, 2016)

2.5.1.3 Secagem Contínua

A secagem contínua é um tipo de secagem artificial em que ocorre a ação contínua do ar aquecido sobre o material úmido até que se atinja o teor de umidade desejado (MILMAN, 2002). Neste método, a fonte de calor utilizada pode variar, mas o ar que atravessa o material é forçado. (BORGES, 2016)

Essa secagem tem o objetivo de passar os sólidos apenas uma vez pela fonte de calor, de maneira que entrem úmidas no secador e percam a umidade com o aquecimento. Dessa forma, o ar flui de forma contínua pelo material através da gravidade e na base do secador, sai seco, havendo resfriamento do mesmo. (TORRES, 2006)

2.5.1.4 Secagem Intermitente

A secagem intermitente consiste no contato permanente das sementes com o ar aquecido, por períodos curtos e intercalados. Assim, o ar flui de forma descontínua pelo material em movimento, sendo este movimento causado pela recirculação do material no secador. (BORGES, 2016; FUNGUETO, 2003)

2.5.1.5 Secagem Estacionária

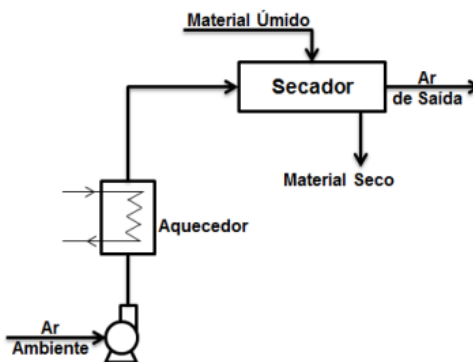
A secagem estacionária é caracterizada pela não movimentação do material enquanto ocorre a secagem. Este método é muito utilizado em grãos colocados em silos secadores, sofrendo a

interferência da ação do ar aquecido. Apresenta uma desvantagem devido à baixa capacidade de secagem por conta da altura da camada de sementes, que é regulada pelo espaço de entrada da secagem e do fluxo de ar. (GARCIA et al., 2001)

2.5.2 Secagem Convectiva

A secagem por convecção com ar quente é um dos métodos mais empregados na agroindústria, com muitos benefícios, como o baixo custo operacional, remoção da umidade garantindo uma maior vida útil ao produto. O processo ocorre em estufas ou secadores, havendo a transferência de calor através da convecção, por meio da troca de calor entre o ar e o material. Dessa forma, o ar aquecido através de uma fonte de energia, transfere o calor para a superfície do sólido do material (BARROS, 2020). O esquema de secagem convectiva pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema da secagem por convecção



Fonte: FELLOWS (2006).

A secagem por convecção é constituída pelo sistema de alimentação do ar, sistema de aquecimento do ar e o compartimento de secagem. O calor do ar de secagem é responsável pelo aumento da temperatura do material, denominado calor sensível, e pela vaporização da água presente no material, denominado de calor latente. (LOPES et al., 2000; VÉRAS, 2010)

Entre os secadores convectivos utilizados, tem-se:

- Estufa de Circulação Forçada

Na estufa de circulação forçada o ar quente é forçado ao redor da câmara do forno através de um ventilador. De forma semelhante a um forno, o ar quente circula através de um sistema de dutos, criando uma distribuição uniforme do ar quente dentro da câmara e proporcionando uma

rápida circulação de calor. Essas estufas operam em temperaturas na faixa de ambiente a um máximo entre 200° e 300°C. (SP LABOR, 2022) Na figura 7 observa-se um modelo da estufa de circulação forçada.

Figura 7 - Estufa de circulação forçada



Fonte: TECNAL (2023)

- Secador Tipo Túnel

Nesse secador ocorre a movimentação contínua dos sólidos úmidos por meio da câmara de secagem pela montagem das bandejas em vagonetes. A secagem é realizada por uma corrente de ar quente, com o túnel não sendo necessariamente aquecido. É utilizado para secar tabuleiros de cera de parafina, gelatina ou sabão e secagem de artigos cerâmicos. Os modelos mais modernos podem ser utilizados na secagem de alimentos, como cereais, batatas, cogumelos, frutas etc. (ZEMPULSKI E ZEMPULSKI, 2007). O modelo do secador tipo túnel é visto na Figura 8.

Figura 8 - Secador tipo túnel



Fonte: ZEMPULSKI E ZEMPULSKI (2007).

2.5.3 Curvas de Secagem ou Cinética de Secagem

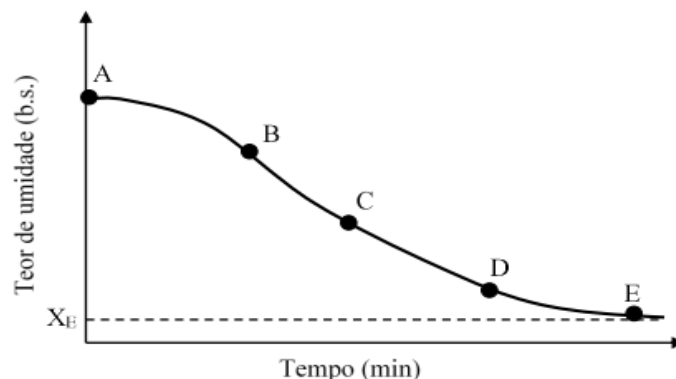
O objetivo do estudo da cinética de secagem é conhecer o comportamento do material em estudo e a previsão do tempo de secagem, sendo os dados experimentais obtidos representados por curvas que relacionam o teor de umidade com o tempo. As curvas são denominadas curvas de secagem. (CARVALHO, 2014; GURGEL, 2014)

As curvas de secagem possibilitam prever o tempo necessário para se obter o teor de umidade desejado e o exato momento em que isso acontece, obtendo-se um produto com qualidade. A partir das informações presentes na curva de secagem, pode-se determinar o tempo de secagem para certa quantidade de material e, com esta informação, determina-se o gasto energético, que irá refletir no custo do processamento, que conseqüentemente influenciará no preço final do produto. (BORGES, 2016.)

As curvas de secagem podem ser determinadas através do acompanhamento da perda de umidade do material com a pesagem direta da amostra ou através do acompanhamento da umidade do gás na entrada e na saída do secador, com o auxílio de equipamentos adequados, como psicrômetros. (KEEY, 1992)

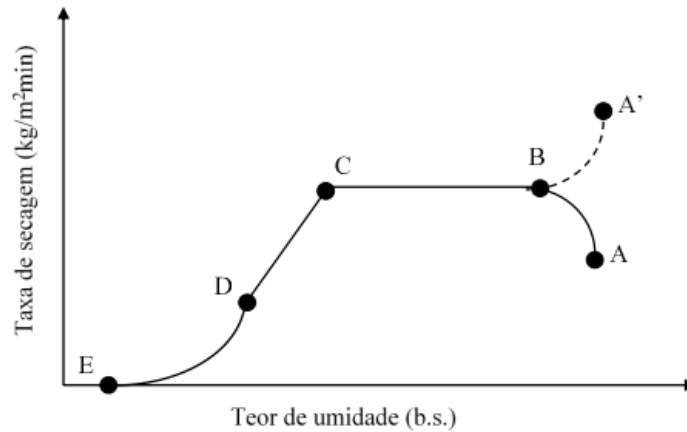
A umidade do ar e a sua temperatura são constantes durante todo o processo de secagem e o fenômeno da convecção é o responsável pelo calor ser transmitido à superfície da amostra. Durante o processo de secagem, é possível destacar 3 etapas importantes: (1) período de estabilização; (2) período de taxa constante; (3) período de taxa decrescente. As transferências de calor e massa no período de taxa constante são analisadas da superfície da amostra ao ar de secagem (DELMIRO, 2016). Na Figura 9 tem-se uma típica curva do processo de secagem e na figura 10 é apresentada a curva típica de taxa de secagem.

Figura 9 - Curva típica do processo de secagem



Fonte: FELLOWS (2006).

Figura 10 - Curva típica de taxa de secagem



Fonte: TREYBAL (1980).

Logo quando o material é colocado no secador, ocorre o período de estabilização, um período curto, em que a superfície do material é aquecida até a temperatura de bulbo úmido. Este período é indicado pelo período (A-B nas Figuras 9 e 10). A partir disso, dá-se início ao processo de secagem em si, caracterizada pela movimentação de água no interior do material na mesma taxa que a água é evaporada da superfície, continuando úmida. Este período é identificado pelo período (B-C das Figuras 9 e 10) e conhecido como período de taxa constante, que finaliza apenas quando um teor de umidade crítico é atingido. A superfície do produto permanece com a temperatura próxima a de bulbo úmido do ar de secagem até o fim do período de taxa constante. (TREYBAL, 1980)

No ponto C (Figuras 9 e 10), há então a redução do teor de umidade do produto além do teor de umidade crítico, e a partir disso, a taxa de secagem começa a decrescer de forma lenta até aproximar-se de zero, no teor de umidade de equilíbrio (X_E) (C-E nas Figuras 9 e 10). Esse período é denominado de período de taxa decrescente. Alimentos considerados higroscópicos, ou seja, que absorvem água do ambiente, possuem dois ou mais períodos de taxa decrescente, já alimentos não higroscópicos possuem apenas um único período. O primeiro período de taxa decrescente (C-D nas Figuras 9 e 10), a evaporação ocorre da superfície para o interior do produto, sendo o vapor d'água difundido por meio do sólido seco para o ar de secagem. Já o segundo período de taxa decrescente (D-E nas Figuras 9 e 10), ocorre quando a pressão de vapor d'água fica abaixo da pressão de vapor saturado, com a secagem ocorrendo por dessorção. (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993)

A umidade de equilíbrio (X_E) é o teor de umidade mínimo em que um material pode ser exposto em um ambiente considerado fixo, ou seja, com ar ambiente, temperatura e umidade relativa fixos ao longo de um período. Corresponde à pressão de vapor de equilíbrio entre o material e o ambiente. (PARRY, 1985)

O teor de umidade é expresso normalmente em função da massa da matéria seca, pois permanece constante durante todo o processo de secagem, diferente do volume úmido, que varia e não é o mais indicado para calcular o teor de umidade. Dessa forma, o teor de umidade em base seca (b.s.) é calculado pela razão entre a massa de água contida na amostra do material e a massa da matéria seca, conforme a Equação 2. (JOHANN, 2016)

$$X_{bs} = \frac{\text{massa de } H_2O}{\text{massa seca}} \quad (2)$$

Onde X_{bs} é a umidade em base seca.

O teor de umidade em base úmida é calculado pela razão entre a massa de água e a massa da matéria úmida conforme a Equação 3:

$$X_{bu} = \frac{\text{massa de } H_2O}{\text{massa úmida}} \quad (3)$$

Onde X_{bu} é a umidade em base úmida.

Para a determinação da taxa de secagem segue-se o procedimento: uma determinada quantidade da amostra do produto é colocada em um recipiente isolado termicamente suspenso em uma balança, com o ar fluindo de forma contínua pelo recipiente. Em certos intervalos de tempo, mede-se o peso da amostra e a partir desses dados, calcula-se a taxa de secagem através da Equação 4. (JOHANN, 2016)

$$N = - \frac{m_{SS} dX}{A dt} \quad (4)$$

Onde:

N: taxa de evaporação (kg/min);

t: tempo (min);

m_{SS} : massa de sólido seco (kg);

A: área de transferência de massa (m^2).

2.6 PLANEJAMENTO FATORIAL

O planejamento fatorial é uma ferramenta que tem como objetivo otimizar experimentos, de forma a reduzir o número de amostras e experimentos alcançando resultados confiáveis. Através dele, pode-se estudar diferentes fatores sobre determinada variável de interesse. Em uma análise com n variáveis, obtém-se 2^n experimentos da variável de resposta. Dessa forma, reduz-se custos e a variabilidade e convergência dos resultados. (BARROS; SCARMINIO; BRUNS, 2007; MELO, 2002)

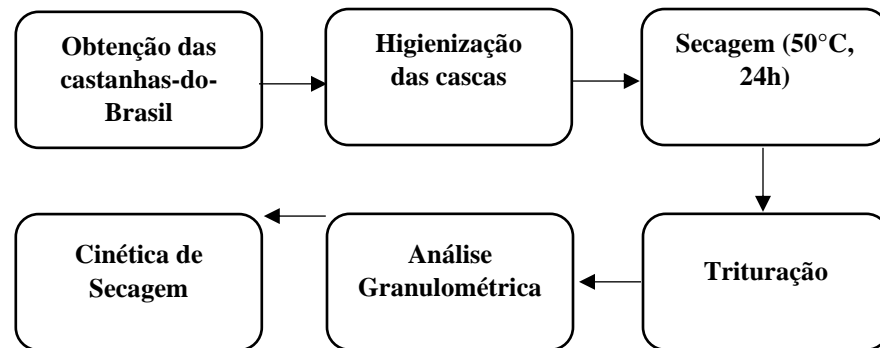
A partir dessa ferramenta calcula-se o erro experimental quando se é repetido pelo menos três vezes a condição do ponto central, o que é considerado indispensável para avaliação da repetibilidade do procedimento (BRANDÃO, 2007). A escolha do planejamento mais adequado está relacionada com a quantidade de variáveis independentes envolvidas na análise. Para duas ou três variáveis recomenda-se o uso do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). (RODRIGUES E IEMMA, 2005)

O DCCR possui uma varredura cruzada dos principais pontos de interesse do espaço amostral captando os pontos dos vértices (referenciados por níveis -1 e 1), pontos centrais (referenciados por nível 0) e pontos extremos fora do espaço amostral (referenciado por $-\alpha$ e $+\alpha$), que permitem obter relações quadráticas para todas as variáveis analisadas. (SOUZA, 2016)

3 MATERIAL E MÉTODOS

O preparo das amostras e os experimentos de secagem foram realizados no Laboratório do Grupo de Pesquisa Química Aplicada à Tecnologia, na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas (EST-UEA), localizado na Av. Darcy Vargas, Parque 10 de novembro, em Manaus. O procedimento seguido está de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma do processo de secagem do endocarpo da castanha-do-Brasil



Fonte: PRÓPRIA.

3.1 OBTENÇÃO E PRÉ-TRATAMENTO

As cascas da castanhas-do-Brasil (Figura 12) foram obtidas em um comércio localizado na Rua do Comércio, no Bairro Parque 10, em Manaus, acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao laboratório.

Figura 12 - Cascas da castanha-do-Brasil



Fonte: PRÓPRIA.

Para a preservação da qualidade da castanha, adotou-se a metodologia proposta por Campo (2004). Para isso, inicialmente cerca de 1,5 kg das cascas foram lavadas em água corrente, tratadas

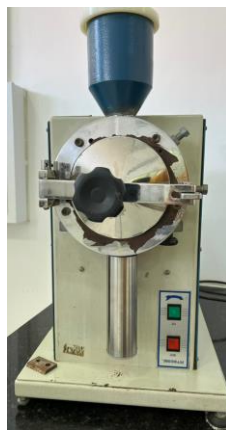
por imersão em água em ebulição por 2 minutos, de forma a reduzir a carga microbológica da matéria-prima. Posteriormente, foram filtradas em peneiras, colocadas em bandejas e acondicionadas em estufa a 50 °C por 24h, afim de remover o excesso de umidade. Em seguida, as cascas foram trituradas por 1h em moinho de facas da marca Marconi, de acordo com a Figura 13 (a), e o material resultante enviado ao agitador da marca Produtest para análise granulométrica, conforme Figura 13 (b), utilizando peneiras com diferentes diâmetros conforme descritos na Tabela 5. A duração da agitação das peneiras foi de 1 hora. Esse processo foi realizado 4 vezes obtendo-se a massa necessária para todos os experimentos.

Tabela 6 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica

Classificação	Tyler	Abertura (mm)
1	16	0,991
2	28	0,581
3	32	0,495
4	35	0,417
5	48	0,295
6	65	0,208
7	100	0,147

Fonte: PRÓPRIA.

Figura 13 – Moinho de facas e agitador de peneiras



(a) Moinho de facas



(b) Agitador de peneiras

Fonte: PRÓPRIA.

3.2 PLANEJAMENTO FATORIAL

O planejamento fatorial adotado neste trabalho compreende a utilização do DCCR nos ensaios de cinética de secagem, tendo como variáveis independentes: carga do material e a temperatura de secagem do material e como variável de resposta a umidade final do material. Na Tabela 6, está disposta a matriz de experimento a partir do DCCR e a Tabela 7 mostra as variáveis de entrada escolhidas e seus respectivos níveis.

Tabela 7 - Matriz de experimentos utilizando o DCCR

Experimento	Replicata	T (°C)	m (g)
1	1	50,00	100,00
2	1	50,00	200,00
3	1	60,00	100,00
4	1	60,00	200,00
5	1	47,93	150,00
6	1	62,07	150,00
7	1	55,00	79,29
8	1	55,00	220,71
9 (C)	1	55,00	150,00
10 (C)	2	55,00	150,00
11	2	50,00	100,00
12	2	50,00	200,00
13	2	60,00	100,00
14	2	60,00	200,00
15	2	47,93	150,00
16	2	62,07	150,00
17	2	55,00	79,29
18	2	55,00	220,71
19 (C)	3	55,00	150,00
20 (C)	4	55,00	150,00

Fonte: PRÓPRIA.

Tabela 8 - Variáveis de entrada e seus níveis para o planejamento fatorial 2^2

Variáveis Originais	Variáveis Codificadas	Níveis				
		Axiais (- α)	Baixo (-)	Ponto central	Axiais (+ α)	Alto (+)
Temperatura(°C)	X ₁	47,93	50	55	60	62.07
Massa(g)	X ₂	79,29	100	150	200	220.71

Fonte: PRÓPRIA.

Os experimentos foram feitos em duplicata com quatro repetições no ponto central, totalizando 20 experimentos, de acordo com o proposto pelo DCCR. A escolha dos níveis adotados para o parâmetro temperatura de secagem, está relacionada com a capacidade de evitar as possíveis micotoxinas presentes nas cascas. E, os experimentos foram realizados de forma randômica de forma que as análises não sejam tendenciosas, aumentando a confiabilidade do resultado obtido.

Para verificação da influência das variáveis, temperatura e carga de material, na umidade final, foi estabelecido o tempo de secagem de 7 horas e 30 minutos (450 minutos) para obtenção da umidade em todos os experimentos.

3.3 CINÉTICA DE SECAGEM

As curvas de cinética de secagem foram realizadas no material proveniente da peneira Tyler 16 utilizada na análise granulométrica, seguindo o delineamento de composto central rotacional proposto. Inicialmente, as amostras foram dispersas em bandejas circulares de alumínio com 15cm de diâmetro, conforme Figura 14a, e com o auxílio de uma balança analítica digital, da marca Shimadzu, modelo AUY220 (Figura 14b), foi medida a carga de material. Na sequência, deu-se início aos ensaios de secagem, por meio da colocação dessas bandejas em estufa de circulação de ar forçada, da marca Tecnal, modelo TE 394/2, conforme Figura 14c.

Figura 14 - Bandeja, estufa de circulação de ar forçada e balança analítica



(a) Bandeja de alumínio



(b) Balança analítica



(c) Estufa de circulação de ar

Fonte: PRÓPRIA.

O procedimento experimental consistiu nas leituras das massas a cada 5 minutos na primeira meia hora de experimento, e a cada 10 minutos nos tempos subsequentes, até peso constante, depois de três pesagens consecutivas. A determinação da umidade do material foi dada de acordo com a Equação 5.

$$X_{bu} = \frac{\text{massa de } H_2O}{\text{massa úmida}} = \frac{m_{ut} - m_{ss}}{m_{ui}} \times 100 \quad (5)$$

em que X_{bu} é a umidade em base úmida, m_{ut} é a massa úmida com o tempo, m_{ss} é a massa de sólido seco e m_{ui} é a massa úmida inicial.

Como tem-se diferentes cargas de material, tem-se diferentes umidades iniciais. Para padronizar as umidades, ao invés da relação teor de umidade x tempo, utilizou-se razão de umidade x tempo. Sendo o teor de umidade obtido de acordo com a Equação 6.

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (6)$$

A massa de sólido seco foi obtida colocando-se 33,145 g da casca em estufa de circulação de ar forçada por 24h a 50°C, pois segundo Pacheco (2007), é a temperatura indicada para eliminar as aflatoxinas do produto. Após as 24h, pesou-se novamente o material para determinação da massa de sólido seco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados.

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As massas retidas em cada peneira, depois da passagem em um agitador, estão dispostas na Tabela 8, resultando num total de 1485 g. É possível identificar que a maior retenção ocorreu na malha de abertura de Tyler 16, em que sua granulometria pode ser visualizada na Figura 15.

Tabela 9 - Massas retidas após agitação das peneiras

Classificação	Tyler	Abertura (mm)	Massa (g)
1	16	0,991	904.23
2	28	0,581	316.06
3	32	0,495	105.14
4	35	0,417	54.34
5	48	0,295	62.64
6	65	0,208	36.71
7	100	0,147	5.04
Coletor			1.45
Total			1485

Fonte: PRÓPRIA.

Figura 15 - Casca da castanha-do-Brasil de granulometria Tyler 16



Fonte: PRÓPRIA.

4.2 CINÉTICA DE SECAGEM

Na Tabela 9, são encontradas a massa úmida e a massa de sólido seco após a passagem em estufa de circulação de ar forçada por 24h a 50°C.

Tabela 10 - Determinação da massa de sólido seco

Massa úmida (g)	Massa de sólido seco (g)
33,143	31,796

Fonte: PRÓPRIA

Na Tabela 10 tem-se os resultados da umidade final, para cada ensaio de cinética de secagem realizado, de acordo com o delineamento cúbico composto rotacionado (DCCR).

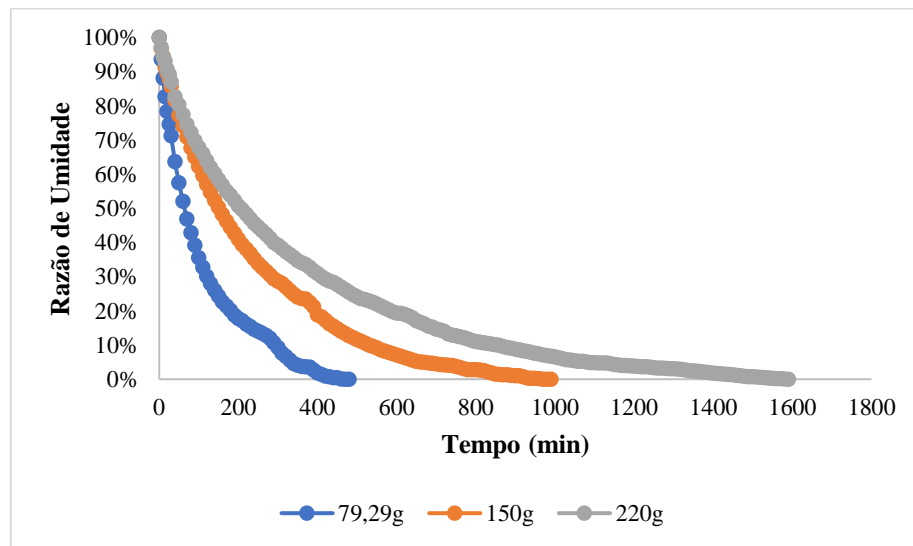
Tabela 11 - Umidade final após cinética de secagem

Experimento	Replicata	T (°C)	m (g)	Umidade Final (%)
1	1	50,00	100,00	10,32
2	1	50,00	200,00	34,12
3	1	60,00	100,00	2,94
4	1	60,00	200,00	20,52
5	1	47,93	150,00	17,28
6	1	62,07	150,00	4,32
7	1	55,00	79,29	0,42
8	1	55,00	220,71	27,73
9 (C)	1	55,00	150,00	17,00
10 (C)	2	55,00	150,00	14,72
11	2	50,00	100,00	10,33
12	2	50,00	200,00	34,36
13	2	60,00	100,00	0,59
14	2	60,00	200,00	20,61
15	2	47,93	150,00	19,29
16	2	62,07	150,00	4,59
17	2	55,00	79,29	0,65
18	2	55,00	220,71	27,40
19 (C)	3	55,00	150,00	14,98
20 (C)	4	55,00	150,00	14,82

Fonte: PRÓPRIA

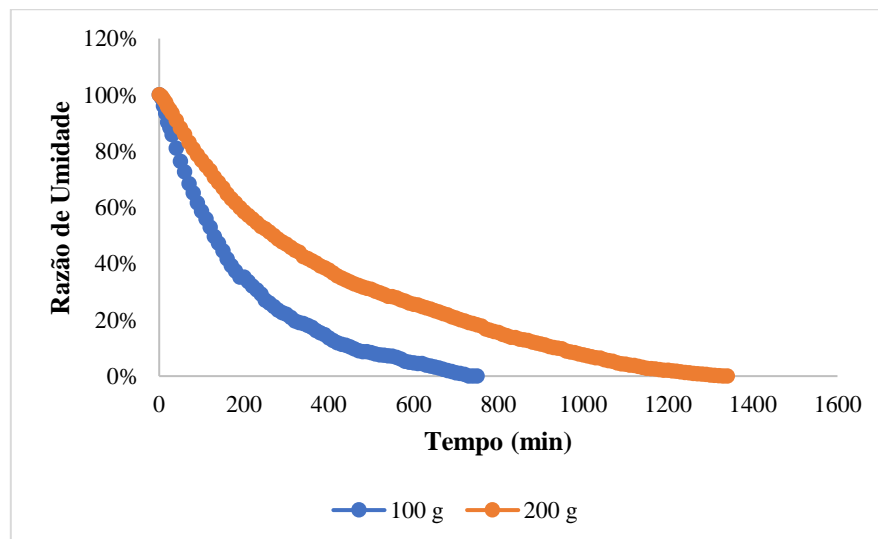
Por meio da inspeção da Tabela 10, pode-se identificar que os experimentos 7 e 17, apresentam os melhores resultados referentes as umidades finais, ou seja, existe uma tendência de que quanto menor for a carga de material e maior for a temperatura (nesse caso a mediana), ocorra uma melhor remoção da umidade existente no material. Essa tendência também com relação a menor carga, pode ser observada nos experimentos 7, 8 e 9, como mostrado na Figura 16, quanto maior a carga na mesma temperatura existe um aumento de umidade não removida pelo ar de secagem, conforme Figura 17 e 18.

Figura 16 - Curva de cinética de secagem a 55°C para 79,29 g, 100 g e 220 g de casca



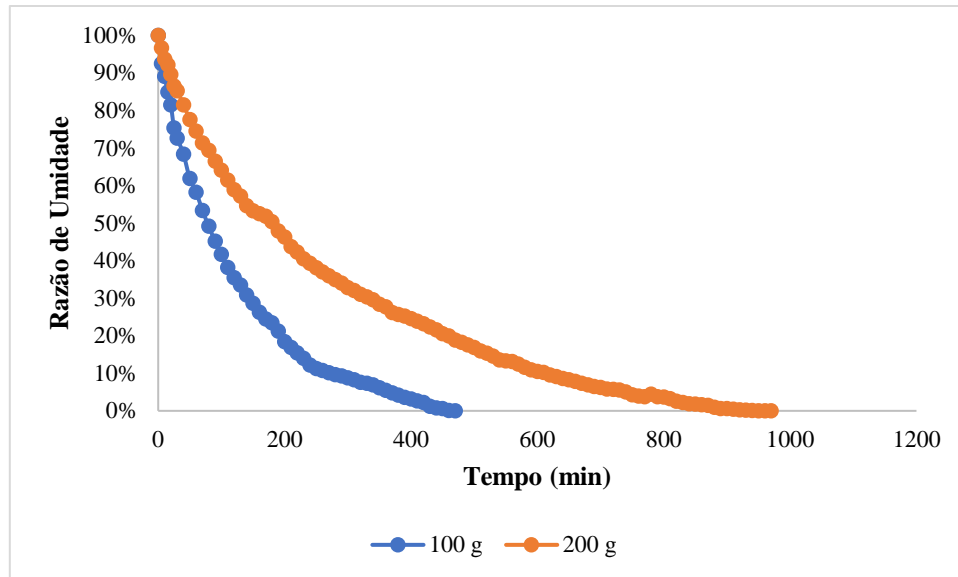
Fonte: PRÓPRIA.

Figura 17 - Curva de cinética de secagem a 50°C com 100 g e 200 g de casca



Fonte: PRÓPRIA.

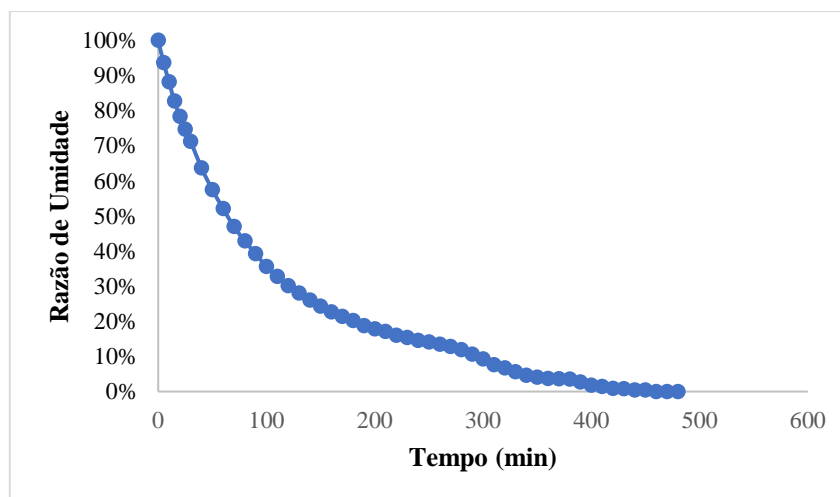
Figura 18 - Curva de cinética de secagem a 60°C com 100 g e 200 g de casca



Fonte: PRÓPRIA

Na Figura 19, observa-se o gráfico do experimento 7, em que foi possível notar o predomínio da remoção da umidade característico do período de taxa decrescente. Nesse período tem-se a remoção da umidade que se encontra na parte mais interna do material, e a taxa de secagem começa a decrescer de forma lenta até aproximar-se de zero, no teor de umidade de equilíbrio. (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993)

Figura 19 - Curva de cinética de secagem a 55°C e 79,29 g de casca

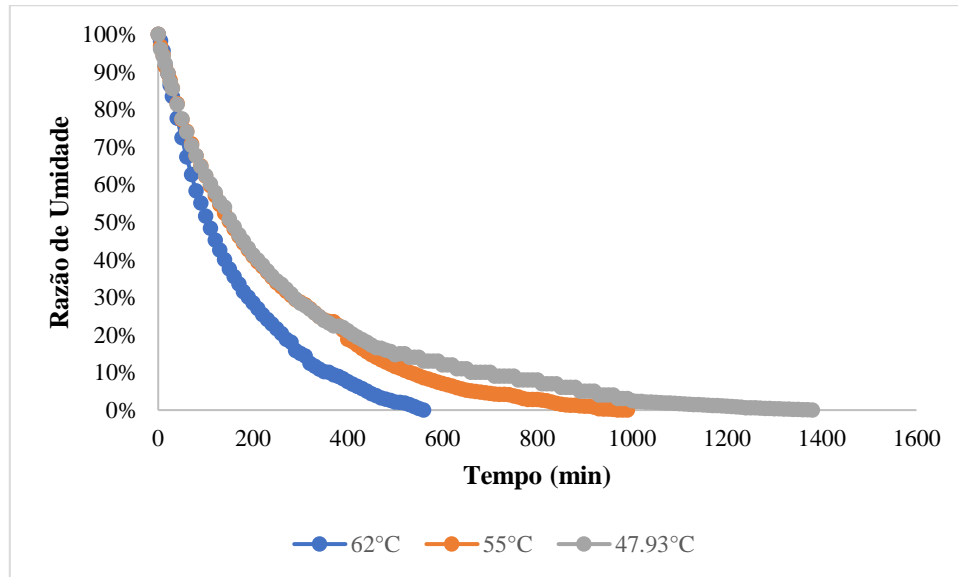


Fonte: PRÓPRIA.

Em relação à influência da temperatura, é possível notar a diferença existente nas Figuras 20, 21 e 22. Observa-se que à medida que a temperatura aumenta, o tempo da secagem é menor.

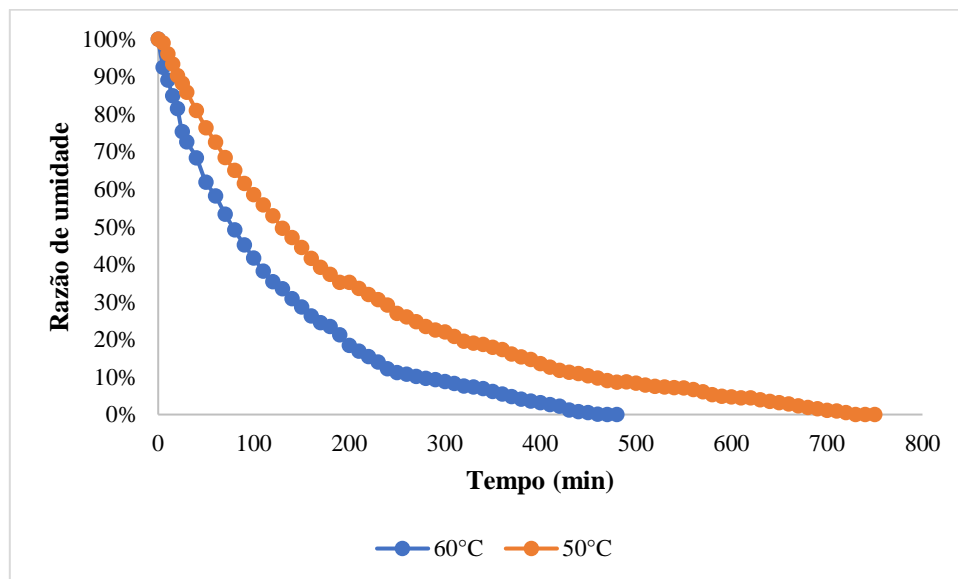
Isso se deve ao fato que a cinética de secagem está relacionada diretamente com a temperatura da operação, pois com o aumento da temperatura há uma maior remoção da umidade do material. (VIGANÓ, 2012) Estas variáveis são muito importantes no processo de otimização da secagem, pois o custo dessa operação está diretamente ligado ao tempo de secagem e temperatura de secagem. (SOUZA, 2013)

Figura 20 - Curva de cinética de secagem com 150 g a 62°C, 55°C e 47,93°C



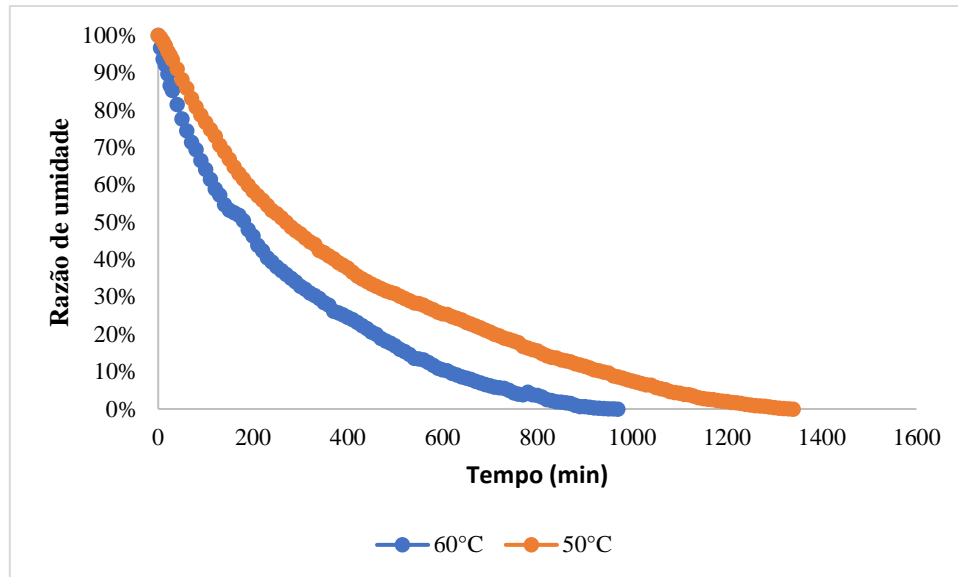
Fonte: PRÓPRIA.

Figura 21 - Curva de cinética de secagem com 100 g a 50°C e 60°C



Fonte: PRÓPRIA.

Figura 22 - Curva de cinética de secagem com 200 g a 50°C e 60°C



Fonte: PRÓPRIA.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A partir dos ensaios foi possível realizar análise estatística com o auxílio do software Statistica versão 13.5. A análise de variância (ANOVA) da variável de resposta umidade final está apresentada na Tabela 11.

Tabela 12 - Análise de variância para a variável de resposta umidade final

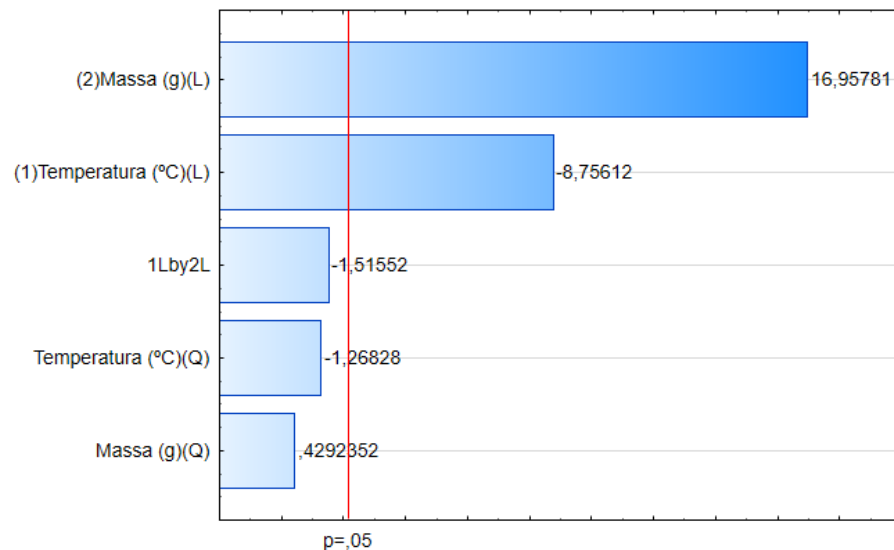
Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	P-valor
Massa (L)	1637,870	1	1637,870	287,5673	0,000000
Massa (Q)	1,049	1	1,049	0,1842	0,674284
Temperatura (L)	436,680	1	436,680	76,6696	0,000000
Temperatura (Q)	9,162	1	9,162	1,6085	0,225384
Massa e Temperatura (L)	13,082	1	13,082	2,2968	0,151891
Erro	79,738	14	5,696		
Total	2183,132	19			

Fonte: PRÓPRIA.

Um dos parâmetros observados na Tabela 11 é o p-valor, um parâmetro estatístico que mostra a influência do efeito com a resposta gerada, que nesse caso é a umidade final. Para se obter um nível de confiança de 95%, é necessário que o valor de p esteja abaixo de 0,05. Dessa forma, de acordo com a Tabela 11, observa-se que o p-valor está abaixo de 0,05 para a massa linear (L) e temperatura linear (L), ou seja, estas variáveis são estatisticamente significativas para a determinação da umidade final. Porém, as variáveis quadráticas e a relação entre a temperatura e a massa não são estatisticamente significativas. Com relação ao coeficiente de determinação R^2 -adj, foi obtido um percentual de 96,35%, garantindo uma ótima representatividade dos resultados.

No gráfico de Pareto (Figura 23), com 95% de confiabilidade nota-se também quais são as variáveis significativas para o processo.

Figura 23 - Diagrama de Pareto



Fonte: PRÓPRIA.

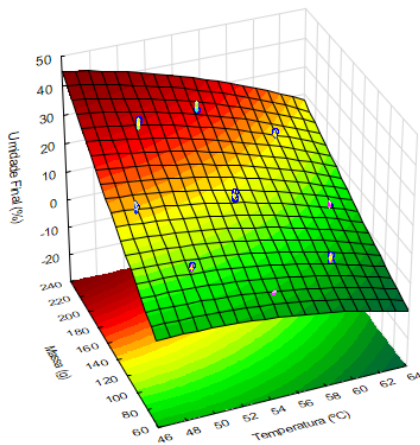
A massa linear, representada por m (L), e a temperatura linear, representada por T (L), são as variáveis que possuem efeito significativo no processo. A carga de material tem um efeito positivo, indicando que um aumento linear da carga de material proporciona uma umidade final maior, assim como um aumento da temperatura linear, propicia uma redução na umidade final, mas não tanto quanto ao comparado ao aumento de carga de material.

Com a análise estatística foi possível obter um modelo para a determinação da umidade final no processo de secagem do endocarpo da castanha-do-Brasil em função da carga de material e temperatura lineares, conforme Equação 6.

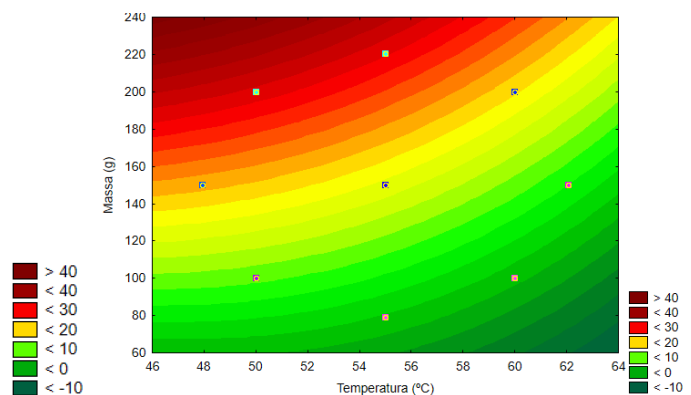
$$\text{Umidade final (\%)} = -1,178 + 0,0413 \times T + 0,0004 \times m \quad (6)$$

Já na Figura 24, observa-se a superfície de resposta que avalia a interação das variáveis e a influência que geram na umidade final. Percebe-se que a superfície é linear, mostrando que as variáveis carga de material e temperatura lineares são as que realmente possuem significado estatístico para o modelo em questão. Pode-se observar que o ponto ótimo, ou seja, onde a umidade final é menor, ocorre quando a temperatura é maior e a massa é menor, assim como foi possível observar no gráfico de Pareto. Com o gradiente (Figura 23 b) é possível observar o efeito negativo da temperatura e efeito positivo da carga de material no sentido de crescimento da cor vermelha para a verde. Dessa forma, pode-se dizer que quanto maior a temperatura e quanto menor a carga de material, será obtida uma menor umidade final.

Figura 24 - Superfície de resposta para umidade final em função das variáveis operacionais (temperatura e massa) e gradiente de contorno



(a) Superfície de resposta



(b) Gradiente de contorno

Fonte: PRÓPRIA.

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado em relação a secagem do endocarpo da castanha-do-Brasil foi de grande importância por utilizar um resíduo descartado em larga escala na região amazônica e que possa a ser reutilizado em outros tipos de processos de separação bem como trazer informações sobre a secagem deste tipo de material, até então não encontrados na literatura.

Com a análise granulométrica realizada, foi possível identificar que na granulometria Tyler 16, obteve-se a maior quantidade de material. E nessa granulometria as umidades obtidas nos ensaios de cinética de secagem foram eficazes de acordo com o determinado pelo MAPA (menor que 15%) e pela literatura com um teor de umidade de até 4,57%.

A partir do comparativo das curvas de cinética de secagem obtidos por meio dos experimentos realizados, foi possível identificar a influência das duas variáveis operacionais utilizadas, temperatura e carga de material, durante o processo de secagem. Nota-se que tanto para temperaturas fixas e diferentes cargas como para uma carga fixa com diversas temperaturas, ocorre uma diminuição do tempo do processo de secagem.

Com a análise estatística a partir do planejamento fatorial DCCR realizado, verifica-se a influência da carga de material e temperatura na umidade final do material, mostrando que quanto maior a carga de material, maior será a umidade final, tendo-se assim um efeito positivo, e quanto maior a temperatura, menor será a umidade final obtida, tendo-se um efeito negativo. Com a combinação desses dois fatores nessas condições se chega a uma menor umidade final para a casca da castanha-do-Brasil.

6 PERSPECTIVAS

Na operação de secagem é possível observar a influência de diversas variáveis que podem modificar o processo, otimizando-o ou não. Além disso, a operação permite que muitos produtos orgânicos tenham uma vida útil prolongada mantendo suas características físicas e químicas, e podendo até mesmo tornar um resíduo em um produto com valor agregado, como é o caso da casca da castanha-do-Brasil. Devido a isso, algumas perspectivas que podem ser estudadas são:

- Análise de outras variáveis que podem influenciar na curva de cinética de secagem, como a velocidade do ar de secagem;
- Influência da granulometria na curva de cinética de secagem;
- Determinação de aflatoxinas nas cascas da castanha-do-Brasil antes e após a secagem.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. J. **Do extrativismo à domesticação: as possibilidades da castanha-do-pará.** 2015. 304 f. Tese (Doutorado) - Curso de História, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- ÁLVARES, V. S. et al. **Qualidade da castanha-do-brasil do comércio de Rio Branco, Acre.** *Acta Amazonica*, v. 42, n. 2, p. 269-274, 2011.
- ALVES, J. A. et. al.; **Qualidade de produto minimamente processado à base de abóbora, cenoura, chuchu e mandioquinha-salsa.** *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 30, n. 3, 2010.
- ANJOS, D. B. DOS; et al. Potencial da casca da castanha do Brasil como biofertilizante no cultivo de *Lactuca sativa* L. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v.4, n.1, 17 jul. 2017.
Disponível em:<<https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/1014>>. Acesso em: 30 de jul de 2022.
- ARRUS, K. et al. **Microbiological and aflatoxin evaluation of Brazil nut pods and the effects of unit processing operations.** *Journal of food protection*, v. 68, n. 5, p. 1060-1065, 2005.
- BARBOSA, L. N. **Otimizando o Processo de Extração e Hidrólise Ácida para Biomassas da Amazônia e do Cerrado.** Palmas, 2021.
- BARROS, S. L. **Modelagem e Simulação de Processo de Secagem Convectiva de Fatias de Kiwi Pré-Tratadas Osmoticamente Utilizando Geometria de Parede Infinita.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Campina Grande, 2020.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R.E. **Planejamento e Otimização de experimentos**, Campinas-SP; editora da UNICAMP, 2007.
- BATISTA, A. P. B. et al. **Spatial association of fruit yield of Bertholletia excelsa Bonpl. trees in eastern Amazon.** *Forest Ecology and Management*, v. 441, n. March, p. 99–105, 2019.
- BAYMA, M. et al. **Aspectos da cadeia produtiva da castanha-do-brasil no estado do Acre, Brasil.** v. 9, n. 2, p. 417–426, 2014.
- BITENCOURT, M. A. et al. **Pós-colheita, morfometria e rendimento de castanhas-do-Brasil da região amazônica.** Rio de Janeiro, 2020.
- BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café.** UFLA: Lavras, 361 p., 2008.
- BORGES, F. B. **Descrição da Secagem Convectiva de Grãos de Milho Através de Modelos Difusivos.** Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – 2016.
- BOUVIE, L. et al. **Caracterização físico-química dos frutos de castanheira do Brasil.** *Nativa*, 4(2), 107-111, 2016.

BRANDÃO, K. S. R. **Otimização do Processo de Produção de Biodiesel Metílico e Etilico do Óleo de Mamona (*Ricinus Communis L.*) Aplicando um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)**. Dissertação (Mestrado). Curso de Química Analítica. São Luís, 2007.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa n. 11, de 22 de Março de 2010. Estabelece os critérios e procedimentos para o controle higiênico sanitário da castanha-do-brasil e seus subprodutos**. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/inspecao/produtosvegetal/legislacao/normativos-cgqv/csh_pov/IN11.pdf/view>Acesso: 11 Set, 2020. Acesso em: 27 de julho.

CAMPO/PAS. **Manual de Segurança e Qualidade para a Cultura da castanha do Brasil**. Série Qualidade e Segurança dos Alimentos. Brasília, DF: Campo PAS, 2004.

CARDARELLI, H. R.; OLIVEIRA, A. J. **Conservação do leite de castanha-do-Pará**. Scientia Agrícola, v. 57, n. 4, p. 617-622, 2000.

CARDOSO, B. R. et al. **Brazil nuts: Nutritional composition, health benefits and safety aspects**. Food Research International, v. 100, n. August, p. 9-8, 2017.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. (Coleção espécies arbóreas, v.5), EMBRAPA: Brasília, 634 p., 2014.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 588 p. 2000.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Embrapa Cerrados, p. 51, 2010.

COSTA, J. R. et al. **Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central**. Embrapa Amazônia Ocidental-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2009.

COSTA, J. R. et al. **Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central**. Acta Amazonica, 39(4), 843-850, 2009.

COUTO, L. C. et al. **Vias de valorização energética da biomassa**. Biomassa & Energia, 1(1), 71-92., 2004.

DELMIRO, T. M. **Secagem da Cenoura (*Daucus carota L.*) pelo Método FOAM-MAT**. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

DIAS, J. M. C. S. et al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78690/1/DOC-13.pdf>. Acesso em: 29 set. 2019.

DIJIGOW, P.(2021). **Castanheira-do-Brasil: uma gigante da Amazônia**. 2021. Disponível em: <<https://www.escoladebotanica.com.br/post/castanheira-do-brasil>>. Acesso em: 25 de jul de 2022.

DOS ANJOS, D. B.; et al. **Potencial da casca da castanha do Brasil como biofertilizante no cultivo de *Lactuca sativa* L..** *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*, v. 4, n. 1, 17 jul. 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/1014>. Acesso em: 30 de julho de 2022.

FELIX, A. M. E. et al. **Contaminação de castanha do Brasil por aflatoxinas: Uma revisão do panorama atual**. *Journal of the Health Sciences Institute*, 36, 205-210, 2018.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: Princípios e prática**. 2ª edição. Porto alegre: Artmed, 2006. 602p.

FERREIRA, A.G., **Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de uma Chaminé Solar como Secador de Alimentos**. 2004. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FORMIGONI, I. **A exportação de castanha do Pará**. 2018. Disponível em: <https://www.farmnews.com.br/dados/exportacao-de-castanha-do-para/>. Acesso em: 20 jul de 2022.

FREITAS-SILVA, O.; VENÂNCIO, A.; **Brazil nuts: benefits and risks associated with contamination by fungi and mycotoxins**. *Food Research International*, v. 44, n. 5, p. 1434-1440, 2011.

FUNGUETO, C., I. **Efeitos da secagem intermitente sobre a germinação de sementes de arroz (*Oryza Sativa L.*)**. *Uruguiana*, v. 10, n. 1, pp. 34-41, 2003.

GARCIA, D. C. et al. **Secagem estacionaria de sementes de trigo com ar ambiente forçado**. *Revista Brasileira de Sementes*, vol. 23, nº 2, pp.275-280, 2001.

GONÇALVES, Alexandre Campos; CARVALHO, Francisco Adriano de Oliveira. **ESTUDOS DE ADSORÇÃO DE CORANTES INDUSTRIAIS USANDO CARVÃO ATIVADO OBTIDO DA CASCA DA CASTANHA DO PARÁ (*BERTHOLLETIA EXCELSA*)**. V Seminário de Iniciação Científica, Marabá, 26 set. 2019.

GURGEL, C. E. M. R. **Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata L.*) em camada de espuma - desempenho do processo e características do produto**. 2014. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: The AVI Publishing Company, 382 p. 1980.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS**, 2016.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS**, 2019.

JANGAM, S. V., MUJUMDAR, A. S. **Basic concepts and definitions in drying of foods, vegetables and fruits** – volume 1. 1.ed, Singapore, 2010.

JOHANN, G. **Modelagem, Simulação e Otimização de Secadores Convectivos de Grãos: Determinação da Eficiência Energética**. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia Química. Maringá, 2016.

KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate material**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992, p. 215-251.

KLUCZKOVSKI, A. M. **Fungal and mycotoxin problems in the nut industry**. Current Opinion in Food Science, v. 29, p. 56-63, 2019.

KORNEXL, L. W. **Limites e chances econômicas da produção e comercialização de Castanha-do-Brasil para pequenos produtores**. POEMA. Tropic, n. 4, jul./dez. 1999.

LOPES, R. P. et al. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 1ª ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.

MARCINKOWSKI, E. A. **Estudo da Cinética de Secagem, Curvas de Sorção e Predição de Propriedades Termodinâmicas da Proteína Texturizada da Soja**. Porto Alegre, 2006.

MASSI, F. P. et al. **Brazil nuts are subject to infection with B and G aflatoxin-producing fungus, *Aspergillus pseudonomius***. International Journal of Food Microbiology, v. 186, p. 14–21, 2014.

MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**, 5ª Ed., New York: McGraw-Hill, 1993.

MELO, K. P. **Estudo de um secador atmosférico por contato indireto com agitação mecânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Área de Concentração em Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. 2002.

MELO, R. **Castanha da Amazônia estudos de produção e mercado**. 1999 - 2000. Coordenação das Organizações Indígenas da Amazônia Brasileira – COIAB, Centro Indígena de Produção e Cultura. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/M6D00044.pdf>. Acesso em: 25 de julho de 2022.

MELO, S. S. **Produção de Carvão Ativado a Partir da Biomassa Residual da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) Para Adsorção de Cobre (II)**. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Química. Universidade Federal do Pará. Belém, 2012.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Ed. Universitário/UFPel, 2002. 206 p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. ANVISA. **Resolução nº 07/2011, de 18 de fevereiro de 2011.** Limites máximos tolerados (LMT) de micotoxinas em alimentos. Brasil, 18 fev. 2011.

MOREIRA, C. F. **Adsorção do Corante Têxtil Azul de Metileno Usando Como Adsorvente a Casca da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*).** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Química. Universidade Federal do Pampa. Bagé, 2021.

NASCIMENTO, W. M. O. et al. **Castanha-do-Brasil.** Funep: Jaboticabal, 41 p., 2010.

NOGUEIRA, R. M. et al. **Physical properties of Brazil nuts.** Engenharia Agrícola, v. 34, n. 5, p. 963- 971, 2014.

NOGUEIRA, R. M. **Secagem da Castanha-do-Brasil em Condições de Floresta e Carbonização do Resíduo do Fruto da Castanheira.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Viçosa, 2011.

OLIVEIRA, J. M. C., LOBO, P. C. **Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa amazônica.** In: 4 o Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, 2002.

PACHECO, A.M. Florianópolis. **Selênio e aflatoxinas em castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K) e qualidade de produtos derivados.** Tese (Doutorado em Ciência de Alimentos). Florianópolis/SC: a – Universidade Federal de Santa Catarina, 144p. 2007.

PARRY, J.L. **A review of mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying.** Journal of Agricultural Engineering Research, v.32, p. 1-29, 1985.

REZA, M. S. et al. **Preparation of activated carbon from biomass and its' applications in water and gas purification, a review.** Arab Journal Of Basic And Applied Sciences, 27(1), 208-238, 2020.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos.** 1ª ed. Campinas, 2005.

SANTANA, A. C. DE et al. **O Custo Socioambiental da Destruição de Castanheiras (*Bertholletia excelsa*) no Estado do Pará.** Revista de Estudos Sociais, v. 18, n. 37, p. 3, 2017.

SANTOS, J. U. M. et al. ***Bertholletia excelsa* Humboldt & Bonpland (*Lecythidaceae*): aspectos morfológicos do fruto, da semente e da plântula.** Boletim do Museu Paraense Goeldi, Ciências Naturais, Belém, PA, v. 1, n. 2, 2006.

SANTOS, O. V. dos. **Desenvolvimento de barras de alto teor protéico a partir da castanha-do-Brasil.** 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008. Disponível em:<http://ppgcta.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2008/Orquídea%20dos%20Santos.pdf> . Acesso em: 29 julho 2022.

SANTOS O. V. et al. **Processing of Brazil-nut flour: characterization, thermal and morphological analysis**, 2010. Cienc Tecnol Aliment. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cta/v30s1/40.pdf>. Acesso em: 29 de julho 2022.

SILVA, T. P. DA; PONTES, A. N.; ALBUQUERQUE, A. R. **Cadeias de produção sustentáveis no extrativismo de castanha do brasil na Amazônia brasileira**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 8, p. 63460–46780, 2020.

SILVA, L. D. J. DE S. et al. **O Extrativismo Como Elemento De Desenvolvimento E Sustentabilidade Na Amazônia: Um Estudo a Partir Das Comunidades Coletoras De Castanha-DoBrasil Em Tefé, Am**. Revista Destaques Acadêmicos, v. 11, n. 2, p. 168–187, 2019.

SILVA, S. **Caracterização química e perfil de ácidos graxos da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K) durante o armazenamento em diferentes embalagens**. Rio Verde, 2021.

SIMÕES, A. V. **Impactos de tecnologias alternativas e do manejo da Castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*, humb. & bonpl., 1808) no controle da contaminação por aflatoxinas em sua cadeia produtiva**. Universidade Federal do Amazonas (Tese de Doutorado). Manaus, AM, p. 70. 2004.

SOUZA, C. D. R. DE; SILVA, K. DE C. DA. **Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) para produção de carvão ativado**. Research, Society and Development, v. 10, n. 2, p. e53310212698, 27 fev. 2021.

SOUZA, M. C. **Estudo da Cinética de Secagem e Análise da Farinha de Yacon (*Smallanthus sonchifolius*)**. Alegre, 2013. Dissertação (Mestrado) – Curso em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2013.

SOUZA, J. M. L., WADT, L. H. O. **Castanha-do-Brasil: Características da planta**. 2016 Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/castanha-dobrasil/arvore/CONT000fzfy7i8602wx5ok0cpoo6a08db1xh.htm>. Acesso em: 25 de julho de 2022.

SOUZA, L. D. P. **Análise do Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Submetidas às Altas Temperaturas Utilizando a Metodologia do Planejamento Fatorial**. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Civil. João Pessoa, 2016.

SOUZA, R., TRINDADE, A. **A biomassa como solução energética para o estado do Amazonas**. In: 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, São Paulo, 2015.

SP LABOR. **O que é uma estufa circulação forçada?** Disponível em: < <https://www.splabor.com.br/blog/guia-do-comprador/o-que-e-uma-estufa-circulacao-forcada-para-que-serve/>>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

TECNAL. **Estufa com circulação de ar**. Disponível em: https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/8222_estufa_com_circulacao_de_ar. Acesso em: 10 mar de 2023

- TOLEDO, R. A. DE et al. **Panorama nacional da cadeia de valor da castanha-do-brasil**. 2016.
- TONINI, H. **Fenologia da castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., Lecythidaceae) no sul do estado de Roraima**. *Cerne*, v. 17, n. 1, p. 123-131, 2011.
- TORRES, M. A.P. **Desempenho de diferentes métodos de secagem, seus efeitos sobre a qualidade fisiológica de sementes de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)**. Porto Alegre, RS – Brasil. p. 23. Dissertação de Mestrado, 2006.
- TREYBAL, Robert E. **Mass transfer operations**. New York, v. 466, 1980.
- VÉRAS, A. O.M. **Secagem de Pimenta dedo-de-moça (*Capsicum baccatum* var. *pendulum*) em secador convectivo horizontal**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2010.
- VIGANÓ, J. **Propriedades termodinâmicas de adsorção de água e cinética de secagem de subprodutos da industrialização de abacaxi (*ananás comosus*) – casca e cilindro central**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. São José do Rio Preto, 2012.
- VISHWANATHAN, K. H. et al. **Hot air assisted infrared drying of vegetables and its quality**. *Food Science and Technology Research*, v.16, n.5, p.381 – 388, 2010.
- WADT, L. H. DE O. et al. **Primary and secondary dispersal of *Bertholletia excelsa*: Implications for sustainable harvests**. *Forest Ecology and Management*, v. 415–416, n. February, p. 98–105, 2018.
- YANG J. **Brazil nuts and associated health benefits: a review**. *Food Sci Technol*. 2009. Disponível:https://www.researchgate.net/publication/223004187_Brazil_nuts_and_associated_health_benefits_A_review. Acesso em: 29 de julho 2022.
- ZEMPULSKI, M. F. S.; ZEMPULSKI, L. N. **Equipamentos e Processos de Secagem**. Instituto de Tecnologia do Paraná – Dossiê Técnico. 2007.