



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA**



TESE DE DOUTORADO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE
PRODUTOS AGRÍCOLAS

**SECAGEM CONVECTIVA NA RECUPERAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS
DO RESÍDUO DO PROCESSAMENTO DA POLPA DE CUMBEBA
(*Tacinga inamoena*)**

JOÃO PAULO DE LIMA FERREIRA

CAMPINA GRANDE, PB

NOVEMBRO - 2021

JOÃO PAULO DE LIMA FERREIRA

**SECAGEM CONVECTIVA NA RECUPERAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS
DO RESÍDUO DO PROCESSAMENTO DA POLPA DE CUMBEBA**

(Tacinga inamoena)

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola.

ORIENTADORES: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz

Prof^a. Dr^a. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo

CAMPINA GRANDE, PB

NOVEMBRO - 2021

F383s

Ferreira, João Paulo de Lima.

Secagem convectiva na recuperação de compostos bioativos do resíduo do processamento da polpa de cumbeba (*Tacinga inamoena*) / João Paulo de Lima Ferreira. – Campina Grande, 2022.

143 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz, Prof.^a Dr.^a Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo".

Referências.

1. Resíduo. 2. Taxa de Secagem. 3. Modelagem Matemática. 4. Difusividade Efetiva. 5. Compostos Bioativos. 6. Compostos Fenólicos. 7. Betalaínas. I. Queiroz, Alexandre José de Melo. II. Figueirêdo, Rossana Maria Feitosa de. III. Título.

CDU 582.661.56:66.047(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

JOÃO PAULO DE LIMA FERREIRA

SECAGEM CONVECTIVA NA RECUPERAÇÃO
DE COMPOSTOS BIOATIVOS DO RESÍDUO DO
PROCESSAMENTO DA POLPA DE CUMBEBA
(*Tacinga inamoena*)

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola como
pré-requisito para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 30/11/2021

Alexandre José de Melo Queiroz – Orientador – PPGEA/CTRN/UFCG

Rossana Maria Feitosa de Figueiredo – Orientadora – PPGEA/CTRN/UFCG

Wilton Pereira da Silva – Examinador Interno - PPGEA/CTRN/UFCG

Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva – Examinadora Externa - UAF/CCT/UFCG

Dyego da Costa Santos - Examinador Externo - IFRN



Documento assinado eletronicamente por **Dyego da Costa Santos, Usuário Externo**, em 01/12/2021, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WILTON PEREIRA DA SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 01/12/2021, às 20:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CLEIDE MARIA DINIZ PEREIRA DA SILVA E SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 01/12/2021, às 20:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ROSSANA MARIA FEITOSA DE FIGUEIREDO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 02/12/2021, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE JOSE DE MELO QUEIROZ, PROFESSOR 3 GRAU**, em 02/12/2021, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1986560** e o código CRC **D18A4068**.

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, por guiar todos os meus passos pelas estradas com acertos e erros, alegrias, tristezas e decepções, mas sempre na busca de um ideal. Hoje me sinto, apesar das perdas ao longo do percurso, um pouco mais realizado e agradeço a Deus pela oportunidade de realizar mais um sonho.

À minha família, por todo o apoio e confiança. Ao meu pai, Francisco (*in memoriam*), que durante toda sua vida sempre esteve ao meu lado, sendo minha base, exemplo de ser humano, meu herói...por ter me mostrado que a família é um presente de Deus e o bem mais valioso que teremos nesta vida; à minha sogra Fátima e ao meu sogro Carlos, por terem me ensinado o que é força e perseverança e por sempre acreditarem em mim; à minha amada esposa, Cibelle, pela compreensão e companheirismo; aos meus filhos João Pedro e Laura por toda a paciência e suportar a minha ausência em momentos importantes.

Ao meu orientador, professor Dr. Alexandre José de Melo Queiroz, pela paciência, orientação integral e compreensão, deixando-me cada vez mais próximo da realização de mais um sonho.

À minha orientadora, professora Dr^a. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, pelo apoio e orientações significativas para a conclusão desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial o professor Dr. Wilton Pereira da Silva e a professora Dr^a. Josivanda Palmeira Gomes, pelos conhecimentos e experiências compartilhados e por abrirem todas as portas possíveis para viabilizar e tornar possível este projeto.

Aos participantes da banca pela atenção, correções e colaborações dadas para este trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano – IFSertãoPE Campus Petrolina e a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG Campus de Pombal.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq por financiar a bolsa de estudo.

Aos meus colegas dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Engenharia de Processos, em especial Dyego, Júlia, Thalís, Lumara, Yaroslávia e Carolaine, com as quais dividi muitas aflições, pela amizade e companheirismo nessa jornada.

Aos que contribuíram direta e indiretamente para que esta pesquisa fosse realizada.

A todos, muito obrigado!

*Aos meus filhos João Pedro e Laura, à
minha esposa Cibelle e ao meu pai
Francisco (in memoriam)...*

Dedico

“...trabalhe duro no escuro para brilhar na luz”.

Kobe Bryant

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo geral	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Cumbeba (<i>Tacinga inamoena</i>)	4
2.2. Subprodutos agroindustriais como fonte potencial de aditivos alimentares.....	5
2.2.1. Compostos bioativos de subprodutos agroindustriais	6
2.3. Secagem de materiais vegetais	8
2.4. Cinética de secagem de materiais vegetais.....	9
2.5. Influência da secagem no conteúdo de bioativos	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1. Local de realização dos experimentos	12
3.2. Resíduo do processamento da cumbeba	12
3.3. Aditivos e reagentes.....	13
3.4. Secagem convectiva do resíduo.....	13
3.5. Análise de dados da secagem	14
3.5.1. Taxa de secagem.....	15
3.5.2. Modelagem matemática da cinética de secagem.....	15
3.5.3. Equação de difusão ou equação governante	17
3.6. Análises químicas	24
3.6.1. Compostos fenólicos totais.....	24
3.6.2. Flavonoides e antocianinas	24
3.6.3. Betalaínas	25
3.6.4. Análise estatística dos dados	26
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
5. RESULTADOS	60

ARTIGO I	61
ARTIGO II.....	108
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
ANEXO A.....	141
ANEXO B.....	142
ANEXO C.....	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. (a) Cumbebas em diferentes estádios de maturação e (b) destaque para a cumbeba cortada transversalmente, com suas partes constituintes 13

Figura 3. 1. Resíduo integral (esquerda), triturado (centro) e na forma de espuma (direita) 14

ARTIGO I

Figura 1. Teor de água adimensional vs. tempo de secagem em diferentes temperaturas do ar para o (a) RI, (b) RT e (c) RE: (*) 50 °C, (■) 60 °C, (◆) 70 °C e (▲) 80 °C 74

Figura 2. Variação da taxa de secagem com o tempo em diferentes temperaturas do ar para o (a) RI, (b) RT e (c) RE: (*) 50 °C, (■) 60 °C, (◆) 70 °C, (▲) e 80 °C 75

Figura 3. Teor de água adimensional vs. tempo de secagem em diferentes formas de pré-tratamentos para as temperaturas do ar de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C: (◆) resíduo integral, (*) resíduo triturado e (■) resíduo pré-tratado como espuma 77

Figura 4. Teor de água adimensional vs. tempo de secagem em diferentes pré-tratamentos para as temperaturas do ar de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C: (◆) resíduo integral, (*) resíduo triturado (■) resíduo na forma de espuma 78

Figura 5. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo matemático de Midilli nas temperaturas de 50-80 °C para o (a) RI, (b) RT e (c) RE: (*) Dados experimentais, (—) Modelo, (■) Dados experimentais, (—) Modelo, (◆) Dados experimentais, (—) Modelo, (▲) Dados experimentais, (—) Modelo 84

Figura 6. (a) Teor de água adimensional previsto pelo modelo de Midilli versus Teor de água adimensional experimental para o (a) RI, (b) RT e (c) RE(*) 50 °C, (■) 60 °C, (◆) 70 °C, (▲) 80 °C e (—) linha de regressão ($RX_{\text{Predicted}} = RX_{\text{experimental}}$) 85

ARTIGO II

Figura 1. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo 3 nas temperaturas do ar de secagem de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C 119

Figura 2. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo 2 nas temperaturas do ar de secagem de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C 121

Figura 3. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo 1 nas temperaturas do ar de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C 123

Figura 4. Cinética de secagem do resíduo de cumbeba nas temperaturas de secagem de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C destacando as distribuições de teor de água adimensional (RX) em t = 60 min e t = 180 min. Os retângulos não estão em escala	125
Figura 5. Distribuições de teor de água adimensional (RX) para a secagem em 50 °C a: (a) t = 60 min; (b) 120 min; (c) 180 min; (d) 240 min; (e) 300 min e (f) 360 min. Os retângulos foram desenhados sem escala	126
Figura 6. Difusividade efetiva de água (D_{ef}) versus temperatura do ar de secagem	127
Figura 7. Coeficiente convectivo de transferência de massa (h) versus temperatura do ar de secagem	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1. Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos..... 16

ARTIGO I

Tabela 1. Modelos utilizados para ajustar as curvas de cinética de secagem do resíduo de cumbeba..... 68

Tabela 2. Resultados das análises estatísticas para os modelos ajustados aos dados da cinética de secagem convectiva do resíduo de cumbeba 81

Tabela 3. Difusividade efetiva de água (D_{ef}), coeficiente convectivo de transferência de massa (h) e energias de ativação para diferentes condições de secagem do resíduo de cumbeba..... 86

Tabela 4. Energias de ativação da difusão de água 88

Tabela 5. Compostos bioativos do resíduo fresco e seco sob diferentes condições de secagem 89

ARTIGO II

Tabela 1. Difusividade efetiva de água para o modelo 3..... 118

Tabela 2. Difusividade efetiva de água para o modelo 2..... 120

Tabela 3. Difusividade efetiva de água, coeficiente convectivo de transferência de massa e número de Biot para o modelo 1 122

LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS

Letras Latinas

A, B	Parâmetros de ajuste
A_n	Coefficientes das soluções analíticas dependentes da posição
B_n	Coefficientes das soluções analíticas para o valor médio
Bi	Número Biot de transferência de massa (adimensional)
D_{ef} ou D_{eff}	Difusividade efetiva de água (m^2/s)
D_0	Fator pré-exponencial da equação de Arrhenius (m^2/s)
E_a	Energia de ativação (J/mol)
EAG	Equivalente ácido gálico
h	Coefficiente convectivo de transferência de massa (m/s)
L	Espessura da placa (m)
X	Teor de água (g de água/g de matéria seca)
$X(x,t)$	Teor de água local (g de água/g de matéria seca)
$\bar{X}(t)$	Teor médio de água (g de água/g de matéria seca)
X_{eq}	Teor de água de equilíbrio (g de água/g de matéria seca)
X_0	Teor de água inicial (g de água/g de matéria seca)
$RX(t)$	Razão de teor de água no instante t (adimensional)
\overline{RX}_i^{exp}	Razão de teor de água do i-ésimo ponto experimental (adimensional)
\overline{RX}_i^{ana}	Razão de teor de água do i-ésimo ponto analítico (adimensional)
N ou n	Número inteiro positivo ou índice de somas (adimensional)
N_p	Número de pontos experimentais (adimensional)
R	Constante universal dos gases (kJ/mol K)
R^2	Coefficiente de determinação (adimensional)
t	Tempo (min)
T	Temperatura ($^{\circ}C$)
x	Posição em coordenadas cartesianas (m)

Abreviações

b.s. ou d.b.	Base seca
--------------	-----------

DQM	Desvio quadrático médio
TX	Taxa de secagem
Letras Gregas	
Δt	Diferença entre o tempo atual (t_i) e o tempo anterior (t_0) de secagem (min)
χ^2	Qui-quadrado ou função objetivo (adimensional)
μ_n	Raízes das equações características para condição de contorno do primeiro e terceiro tipos
σ_i	Desvio padrão do i-ésimo ponto experimental
Subescritos	
t_0	Tempo anterior (min)
t_i	Tempo atual (min)
e	Equilíbrio
exp,i	Experimental
pred,i	Previsto
Sobrescritos	
–	Média

RESUMO

O resíduo de cumbeba, um subproduto gerado a partir do processamento de frutos de *Tacinga inamoena* (cumbeba), representa uma enorme quantidade de material descartado sem mais aplicações, no entanto, é fonte promissora de compostos bioativos, como compostos fenólicos que podem ser utilizados como antioxidantes naturais, exercendo vários benefícios à saúde. Contudo, a estabilidade dos compostos bioativos pode ser afetada pela secagem, uma etapa importante e necessária para a recuperação dos subprodutos agroalimentares. Assim, objetivou-se neste estudo analisar a cinética de secagem convectiva do resíduo de cumbeba em diferentes temperaturas (50, 60, 70 e 80 °C) e tipo de tratamento (não tratado/integral, triturado e na forma de espuma) e avaliar seu efeito no conteúdo de compostos fenólicos totais, flavonoides, antocianinas e betalaínas; o processo também foi modelado e a difusividade efetiva de água (D_{ef}) foi determinada. Os resultados demonstraram que, independentemente do tipo de pré-tratamento, o aumento da temperatura do ar exigiu tempos mais curtos para atingir o equilíbrio com o ar de secagem. A secagem ocorreu principalmente no período da taxa decrescente. Entre os modelos empíricos e semi-empíricos, o modelo de Midilli foi o melhor na descrição do processo de secagem do resíduo de cumbeba. O modelo difusivo proposto descreveu bem a perda de água, principalmente do resíduo triturado, com bons indicadores estatísticos para todos os ajustes. Os valores de D_{ef} variaram de 6,489 a $11,190 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 2,928 a $12,754 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,539 \times 10^{-8}$ a $12,427 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, com energias de ativação de 22,307, 46,711 e 58,0736 kJ/mol, dentro da faixa de temperatura de 50-80 °C obtidos para o resíduo integral, triturado e na forma de espuma, respectivamente. Em comparação com o resíduo triturado e na forma de espuma, o resíduo integral seco apresentou maior retenção de compostos fenólicos totais, flavonoides, antocianinas e betalaínas. Assim, os resultados da secagem convectiva demonstraram ser uma alternativa eficiente para se obter um produto rico em compostos bioativos, principalmente fenólicos, a partir do resíduo de cumbeba e, assim, reaproveitar e agregar valor a esse subproduto.

Palavras-chave: resíduo, taxa de secagem; modelagem matemática, difusividade efetiva, compostos bioativos, compostos fenólicos, betalaínas

ABSTRACT

Cumbeba residue, a by-product generated from the processing of *Tacinga inamoena* (cumbeba) fruits, represents a huge amount of discarded material without further application, however, it is a promising source of bioactive compounds such as phenolic compounds, flavonoids and betalains, which can be used as natural antioxidants, dyes, preservatives and antimicrobials by the food, cosmetics and pharmaceutical industries, exerting several health benefits. Therefore, the extraction of these compounds represents an important path for the management and valorization of cumbeba residue, which would positively reflect on the economy of fruit processing, as well as its environmental impact. However, the stability of bioactive compounds can be affected by drying, an important and necessary step for the recovery of agrifood by-products. Thus, the aim of this study was to analyze the convective drying kinetics of cumbeba waste at different temperatures (50, 60, 70 and 80 °C) and type of treatment (untreated or whole, crushed and in the form of foam) and to evaluate its effect on the content of total phenolic compounds, flavonoids, anthocyanins and betalains; the process was also modeled and the effective water diffusivity (D_{ef}) was determined. The results showed that, regardless of the type of pretreatment, the increase in air temperature required shorter times to reach equilibrium with the drying air. Drying took place mainly in the period of the decreasing rate. Among the empirical models, the Midilli model was the best in describing the drying process of cumbeba residue. The proposed diffusive model well described the loss of water, mainly from the crushed waste, with good statistical indicators for all adjustments. D_{ef} values ranged from 6.489 to 11.190×10^{-6} m²/s, 2.928 to 12.754×10^{-9} m²/s and 1.539×10^{-8} to 12.427×10^{-6} m²/s, with activation energies of 22.307, 46.711 and 58.0736 kJ/mol, within the temperature range of 50-80 °C, obtained for the whole residue, ground and in the form of foam, respectively. Compared to the crushed and foamed residue, the dry whole residue showed higher retention of total phenolic compounds, flavonoids, anthocyanins and betalains. Thus, the results of convective drying proved to be an efficient alternative to obtain a product rich in bioactive compounds, mainly phenolic, from cumbeba residue and, thus, reuse and add value to this agro-industrial by-product.

Keywords: residue, drying rate; mathematical modeling, effective diffusivity, bioactive compounds, phenolic compounds, betalains

1. INTRODUÇÃO

A cumbebeira (*Tacinga inamoena*) é uma planta da família das cactáceas nativa e típica do Nordeste do Brasil. Produz frutos denominados de cumbeba, do tamanho de uma ameixa, com casca amarelo-alaranjada e polpa carnosa amarela que envolve as sementes. Apresenta características sensoriais exóticas e, também, é fonte de nutrientes e compostos bioativos, como vitamina C, betalaínas e compostos fenólicos (SOUZA et al., 2007; SILVA et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2011; DANTAS et al., 2015AB; FORMIGA et al., 2016; LIMA et al., 2016). O processamento da cumbeba para a extração da polpa gera uma grande quantidade de resíduos, correspondendo a 64,70-79,01% da fruta processada (SOUZA et al., 2007; SILVA et al., 2009; FORMIGA et al., 2016), composto por sementes, cascas e resquícios de polpa. Simultaneamente, os resíduos ou subprodutos da agroindústria que não são gerenciados de maneira adequada, podem provocar graves problemas ambientais (RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ et al., 2021) e, também, impacto econômico negativo.

Embora muitas vezes negligenciados, os resíduos de frutos e/ou vegetais, comparados com o produto principal do processamento, podem apresentar teores semelhantes ou até mais altos de compostos bioativos, especialmente de compostos fenólicos (SOONG e BARLOW, 2004; LI et al., 2006; RIBEIRO et al., 2008; AYALA-ZAVALA et al., 2011; CORREIA et al., 2012; DERAKHSHAN et al., 2018). Estes compostos são ingredientes de notável valor agregado para várias indústrias sendo, principalmente, direcionados para novas modalidades terapêuticas (PENG et al., 2009; SUSALIT et al., 2011; ZHANG et al., 2019; MARTÍN-GARCÍA et al., 2020; GRABEŽ et al., 2020) e diferentes aplicações tecnológicas e funcionais nos alimentos, como na estabilização de óleo de girassol, produtos de frango, óleo de anchova e pasta de avelã (IQBAL et al., 2008; KANATT et al., 2010; TOPUZ et al., 2014; ALADEDUNYE et al., 2014; KADERIDES et al., 2015), desenvolvimento de filmes biodegradáveis para alimentos (MOUDACHE et al., 2017), enriquecimento das propriedades funcionais de sorvetes, bolos e biscoitos (ÇAM et al., 2013; ÇAM et al., 2014; LUCA et al., 2014; ŠAPONJAC et al., 2016; KADERIDES et al., 2020), entre outras.

Dessa forma, a natureza renovável e o baixo custo tornam o resíduo de cumbeba, assim como tem sido proposto para outros subprodutos de frutos e/ou vegetais (NUNES et al., 2016), uma interessante matéria-prima para a recuperação de produtos de valor agregado, como compostos bioativos. Entretanto, esse resíduo apresenta uma quantidade de água

intrínseca relativamente alta (82,60 a 89,67%) (SOUZA et al., 2007; NASCIMENTO et al., 2011), dificultando o transporte e conferindo a esse material alto grau de perecibilidade, tornando, portanto, necessário o armazenamento em baixas temperaturas ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) até que seja utilizado, gerando custos operacionais adicionais. Portanto, para possibilitar uma valorização completa do resíduo de cumbeba, métodos ou tecnologias de conservação, como a secagem, devem ser estudados, processo vantajoso pela capacidade de diminuir o peso e o volume e, conseqüentemente, custos relacionados à embalagem, armazenamento e transporte (DOYMAZ, 2013; TZEMPELIKOS et al., 2015), além de promover uma vida útil mais longa (VIUDA-MARTOS et al., 2011; MEDIANI et al., 2014) e facilitar o processo de extração de compostos bioativos de diferentes biomassas vegetais (GARCÍA-PÉREZ et al., 2012; DROSOU et al., 2015; AIRES et al., 2016; ZHANG et al., 2017; GOLDSMITH et al., 2018).

Entre os métodos de secagem, a convectiva ganha destaque por sua capacidade de remover a água de biomassas vegetais de forma simples, eficiente e com baixo custo, comparado, por exemplo, com a liofilização (FERREIRA et al., 2020). No entanto, as condições de secagem, como temperatura e/ou tempo de secagem, tipo de pré-tratamento e também o tipo e complexidade inerente à matriz da biomassa, são fatores-chave que influenciam a qualidade do produto final, principalmente no que se refere aos níveis de compostos bioativos antioxidantes (GUPTA et al., 2011; TELLO-IRELAN et al., 2011; NAKAGAWA et al., 2016; MPH AHLELE et al., 2016; RAMOS et al., 2017; RAHMAN et al., 2018). Em estudos anteriores, observou-se que durante a secagem pode haver tanto a decomposição como a retenção e até a síntese de novas moléculas bioativas (KAO et al., 2011; IGUAL et al., 2012). Isso demonstra que não existe um consenso sobre se os desvios encontrados nos níveis de compostos bioativos, em relação à biomassa fresca, são de caráter exclusivamente negativos ou se podem induzir a efeitos positivos inesperados.

Para o resíduo de cumbeba, não existem estudos sobre a influência das condições de secagem convectiva na dinâmica de remoção de água e na sua composição química. Dessa forma, a hipótese para a realização deste trabalho foi que a recuperação de compostos bioativos (compostos fenólicos, flavonoides, antocianinas e betalaínas) do resíduo de cumbeba poderia ser realizada com melhor desempenho a partir do resíduo na sua forma seca ou desidratada. Por esta razão, investigou-se a otimização do processo de secagem convectiva (temperatura e pré-tratamentos) para maximizar a recuperação de composto fenólicos e outros constituintes bioativos do resíduo de cumbeba.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo geral*

Realizar um estudo teórico-experimental para descrever o processo de secagem convectiva do resíduo do processamento de cumbeba e avaliar seu efeito sobre os compostos fenólicos totais, flavonoides, antocianinas e betalaínas do produto obtido.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Realizar experimentos de secagem convectiva do resíduo do processamento da cumbeba submetido ou não a processo de pré-tratamento (resíduo não tratado/integral, triturado e na forma de espuma), em quatro temperaturas (50, 60, 70 e 80 °C) e ajustar diferentes modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos aos dados das cinéticas de secagem;

- Verificar a retenção dos compostos de interesse (fenólicos, flavonoides, antocianinas e betalaínas) após o processo de secagem convectiva;

- Utilizar soluções analíticas unidimensionais da equação de difusão com condição de contorno do primeiro e do terceiro tipos para a secagem convectiva do resíduo não tratado/integral, triturado e na forma de espuma para a forma geométrica de placa plana;

- Simular a transferência de massa usando os parâmetros determinados (D_{ef} e h), prevendo a distribuição de água em tempos previamente especificados;

- Determinar as energias de ativação da difusão e convecção de água nas diferentes condições de secagem do resíduo de cumbeba.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cumbeba (*Tacinga inamoena*)

A cumbebeira (*Tacinga inamoena*), da família das Cactaceae (cactus), gênero *Tacinga* (Figuras 2.1a e 2.1b), é uma planta endêmica do leste do Brasil (HUNT, 2006), ocorre em todos os estados da região Nordeste e em Minas Gerais (TAYLOR e ZAPPI, 2004; MENEZES et al., 2011; MENEZES et al., 2013), podendo chegar até 1 m de altura. Apresenta cladódios cilíndricos, segmentados em artículos fusiformes a elipsoides, ou raramente elípticos a obovados (30–70×15–30 mm), com ramificações irregulares, folhas reduzidas, espinhos ausentes, gloquídeos presentes e flores sésseis, rotadas a hipocrateriformes (40×25–30 mm). Produz frutos globosos (Figuras 2.1c e 2.1d) (15-30 mm de diâmetro), denominados de cumbeba, com pericarpo amarelo-alaranjado, 15–20 aréolas no pericarpo, com gloquídeos, polpa translúcida com dezenas de sementes (3 mm de diâmetro) (LIMA, 1989; MENEZES et al., 2013), que têm sido relatados como fonte de compostos bioativos, como compostos fenólicos, carotenoides, betalaínas e vitamina C (DANTAS et al., 2015ab; FORMIGA et al., 2016; LIMA et al., 2016, NASCIMENTO et al., 2011; SILVA S et al., 2009; SOUZA et al., 2007), substâncias que foram sugeridas 2012; NISCO et al., 2013, SILVA et al., 2014; SINGH et al., 2015; PLAZA et al., 2016; BARROS et al., 2017; JIMENEZ-AGUILAR et al., 2017; GÜRBÜZ et al., 2018; DELIA et al., 2019; GARCÍA-CAYUELA et al., 2019; ORSAVOVÁ et al., 2019; PEANPARKDEE et al., 2019). Como a maioria dos frutos, o processamento da cumbeba para a extração de polpa gera um grande volume de resíduo, que representa de 64,70 a 79,01% (p/p) dos frutos processados (SOUZA et al., 2007; SILVA S et al., 2009; FORMIGA et al., 2016), sendo constituído por sementes, casca e vestígios de polpa, que são descartados sem mais aplicações, o que se reflete negativamente na economia do processamento dos frutos e constitui um problema ambiental. Esses problemas podem ser mitigados submetendo o resíduo de cumbeba a um processamento que lhe agregue valor econômico.

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 2. 1. (a) e (b) Cumbebeira (*Tacinga inamoena*) e (c) e (d) frutos (cumbebas)

2.2. Subprodutos agroindustriais como fonte potencial de aditivos alimentares

Aproximadamente um terço das partes comestíveis dos alimentos produzidos para consumo humano, quantidade que contabiliza cerca de 1,3 bilhão de toneladas por ano, são perdidas ou desperdiçadas globalmente (GUSTAVSSON et al., 2011). Como tal, a agroindústria usa apenas as partes consideradas nobres de frutas e vegetais, e uma quantidade considerável de cascas, sementes e polpa residual são descartadas como resíduos industriais, o que causa sérios problemas ambientais e também resulta em perdas econômicas. Infelizmente, apenas uma pequena parte desses resíduos, citando-se cascas de citros, resíduos de tomate e resíduos de maçã, são efetivamente utilizados pela indústria para a obtenção de produtos de maior valor agregado (RESENDE et al., 2019).

Assim, é de grande benefício tanto para a economia quanto para o meio ambiente, converter efetivamente a grande porcentagem de subprodutos gerados nas diferentes etapas do processamento de frutas e vegetais em produtos valiosos. Recentemente, pesquisas sobre a obtenção de produtos de maior valor agregado a partir de subprodutos têm sido investigadas, citando-se os compostos bioativos antioxidantes (JORGE et al., 2013; MALDONADO et al., 2014; LENQUISTE et al., 2015; TRABELSI et al., 2016; ALLISON e SIMMONS, 2017; GULLÓN et al., 2018a; MARTÍNEZ-PATIÑO et al., 2019), corantes naturais (GURAK et al., 2014; ARLENE et al., 2015; KOUBAA et al., 2016; YAMASHITA et al., 2017; LIMA et al., 2018; BARROS et al., 2019), fibras alimentares (SÁNCHEZ-

ZAPATA et al., 2010; SÁNCHEZ-ZAPATA et al., 2011; MARTÍNEZ et al., 2012; LÓPEZ-VARGAS et al., 2014; HU e YU, 2015; SELANI et al., 2016), amido (CHEL-GUERRERO et al., 2016; NAKTHONG et al., 2017), óleos comestíveis (NDAYISHIMIYE et al., 2018; SANTOS L et al., 2019; SILVA et al., 2019; Stevanato e Silva, 2019) e enzimas (KETNAWA et al., 2012; SOARES et al., 2012; CHAURASIYA e HEBBAR, 2013; GIL e MAUPOEY, 2018; ROJAS et al., 2018).

2.2.1. Compostos bioativos de subprodutos agroindustriais

A utilização de subprodutos do processamento de alimentos desempenha, no presente, um papel vital na solução de problemas econômicos e ambientais, associados ao descarte direto desses materiais no meio ambiente. Embora os subprodutos de frutas e vegetais, como cascas, sementes e polpa residual, não sejam consumidos e devidamente utilizados, na maioria dos casos, podem apresentar teores semelhantes ou até mais altos de compostos bioativos do que o produto principal do processamento (SOONG e BARLOW, 2004; LI et al., 2006; RIBEIRO et al., 2008; AYALA-ZAVALA et al., 2011; CORREIA et al., 2012). Esse fato torna os subprodutos candidatos promissores para a extração barata e sustentável de compostos bioativos, que podem ser úteis para a indústria de alimentos como fonte de antioxidantes, corantes e antimicrobianos naturais (AYALA-ZAVALA et al., 2010; CONTRERAS-CALDERÓN et al., 2011; MOO-HUCHIN et al., 2014; SEPTEMBRE-MALATERRE et al., 2016; MOGHIMI et al., 2016; CAN-CAUICH et al., 2017; KHARCHOUFI et al., 2018).

A capacidade antioxidante de sementes, casca e polpa de oito variedades de abacate foi determinada por Wang et al. (2010). Para todas as cultivares, as sementes continham teor de fenólicos totais e capacidade antioxidante mais elevadas, enquanto a polpa apresentava os menores valores. O conteúdo de fenólicos totais nas sementes variou de 19,2 a 51,6 mg EAG/g.

Da mesma forma, Butsat e Siriamornpun (2010) também relataram que os subprodutos farelo e casca do arroz, apresentaram maiores valores de compostos fenólicos e atividade antioxidante em comparação com o arroz integral e arroz moído. A fração de casca apresentou as maiores concentrações de fenólicos totais (2,5-2,7 mg EAG/g), enquanto o arroz moído apresentou os valores mais baixos (0,5-0,7 mg EAG/g). A capacidade de eliminar o radical DPPH variou de 85,9 a 86,7%, 42,0 a 89,5%, 37,5 a 68,0% e 25,2 a 39% para as frações de farelo, casca, arroz integral e arroz moído, respectivamente.

Kim et al. (2010), avaliaram a capacidade antioxidante e teores fenólicos de cascas e polpas de manga. Os extratos de casca de manga exibiram maiores capacidades de eliminação de radicais DPPH (1,1-difenil-2-picril-hidrazil) (1,72-92,57%) e concentrações de fenólicos (70,1-92,6 mg EAG/g) que os extratos de polpa de manga, independentemente da maturação. Os extratos da polpa exibiram alguma atividade de eliminação do radical DPPH, apenas, em alta concentração (1000 µg/mL), mas a capacidade de eliminação do radical DPPH era indetectável a 50 µg/mL. Da mesma forma, o extrato de casca exibiu maior efeito antiproliferativo contra todas as linhas de cânceres celulares testados, em comparação com o extrato da polpa.

Uma grande variedade de compostos bioativos é encontrada em tecidos vegetais, como vitamina C, E, carotenoides, compostos fenólicos, flavonoides, entre vários outros (GONZALEZ-AGUILAR et al., 2008; AYALA-ZAVALA et al., 2011), contudo, é importante ressaltar que os compostos fenólicos parecem ser os principais responsáveis pela capacidade antioxidante, porque amostras que apresentam os menores teores de fenólicos, também exibem as menores capacidades de inibição de radicais livres (LIU, 2007; AYALA-ZAVALA et al., 2010; IGUAL et al., 2012; LOURITH e KANLAYAVATTANAKUL, 2013; GAO et al., 2018). Embora mereça mais investigações, estudos também indicaram que esses compostos podem apresentar efeitos antiparasitários e/ou imunomoduladores (AL-MATHAL e ALSALEM, 2012; LABSI et al., 2016; AL-MEGRIN et al., 2017). Vários estudos revelaram que os subprodutos da agroindústria podem ser boas fontes de compostos bioativos, especialmente fenólicos (KATALINIĆ et al., 2010; CAVALCANTI et al., 2011, NISCO et al., 2013; DA SILVA et al., 2014; CRUZ et al., 2016; BIMPILAS et al., 2016; HORUZ et al., 2017; LAVELLI et al., 2017; MAIDIN et al., 2018; ZHU et al., 2019; MAIDIN et al., 2019).

Portanto, a recuperação do resíduo de cumbeba, a exemplo do que tem sido feito com outros subprodutos agroindustriais, para desenvolver novas aplicações, como para a extração de compostos bioativos, pode levar a ganhos econômicos, prevenir ou diminuir problemas ambientais causados pelo descarte direto do resíduo no meio ambiente e contribuir para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva da cumbeba mais rentável e sustentável. No entanto, para que isso aconteça, é necessário que um processamento intermediário crie uma forma estável do resíduo de cumbeba para facilitar o seu gerenciamento posterior em condições de armazenamento, tendo em vista sua alta umidade in natura (82,60 a 89,67% b.u.) (SOUZA et al., 2007; NASCIMENTO et al., 2011), o que exige uso praticamente

instantâneo ou utilização de congelamento até que seja utilizado, com todos os custos operacionais adicionais inerentes a este processo.

2.3. Secagem de materiais vegetais

Uma das etapas críticas para a estabilização de materiais vegetais, como subprodutos da agroindústria de frutos e vegetais, é a operação de secagem, pois produtos secos oferecem a vantagem de serem mais estáveis por um período maior de tempo, sem a adição de qualquer conservante químico (VIUDA-MARTOS et al., 2011; MEDIANI et al., 2014), ocupam menor volume, oferecendo, assim, redução de custos com embalagem, armazenamento e transporte (FALADE et al., 2010; DOYMAZ, 2013; TZEMPELIKOS et al., 2015). Além disso, a secagem também tem sido frequentemente empregada antes da extração de compostos bioativos antioxidantes de subprodutos agroindustriais (ROCKENBACH et al., 2011a,b; AZEVÊDO et al., 2015; TOURNOUR et al., 2015; AIRES et al., 2016; ELBADRAWY e SELLO, 2016; ZEFANG et al., 2016; ALLISON e SIMMONS, 2017; GOLDSMITH et al., 2018; NIPORNRAM et al., 2018; PEIXOTO et al., 2018; SAFDAR et al., 2017; SQUILLACI et al., 2018; ZHANG et al., 2018) e de outras biomassas vegetais (EH e TEOH, 2012; LI e SHAH, 2013; MOURE et al., 2014; ABDENNACER et al., 2015; ZHU et al., 2015; GULLÓN et al., 2018b), visando não somente promover a sua preservação até que sejam utilizados, mas também melhorar a eficiência e o rendimento de extração dos compostos alvo (DROSOU et al., 2015; ZHANG et al., 2017).

Ahmad-Qasem et al. (2016) mostraram que a secagem convectiva é um excelente pré-tratamento, algumas vezes melhor do que a liofilização, ao obterem extratos ricos em compostos bioativos e com alta capacidade antioxidante. Karxan et al. (2015) descobriram que o conteúdo de compostos fenólicos e a atividade antioxidante de extratos de folhas de oliveira, foram significativamente aumentados em consequência da secagem convectiva das folhas em altas temperaturas (3 h, 105 °C). Wei et al. (2013) verificaram que a capacidade total de eliminação de radicais livres do extrato de abóbora amarga aumentou significativamente com o aumento da temperatura de secagem convectiva (40-60 °C) da abóbora, enquanto o conteúdo de compostos fenólicos e flavonoides não foram afetados. Este comportamento pode ser devido ao fato de que mudanças na estrutura celular (paredes celulares, vacúolos, etc.) e/ou inativação de enzimas endógenas (hidrolíticas e oxidativas), como resultado do processo de secagem (CHANG et al., 2006; GALAZ et al., 2017; LOBO

et al., 2017; PRAWIRANTO et al., 2019) facilitam a extração dos compostos bioativos associados (AHMAD-QASEM et al., 2013; WOJDYŁO et al., 2014).

2.4. Cinética de secagem de materiais vegetais

A secagem convectiva de materiais vegetais ocorre principalmente no período de taxa decrescente (SILVA et al., 2014a; TORKI-HARCHEGANI et al., 2016; SIVAKUMAR et al., 2016; ASHTIANI et al., 2017) que é governado pelo movimento de difusão interno de água até a superfície do material (AL-MUHTASEB et al., 2010; SINGH et al., 2012; DOYMAZ, 2017), podendo ser simulado com modelos matemáticos, uma ferramenta potencialmente útil para otimizar o processo e ajudar a entender os mecanismos que afetam o transporte de água, sejam internos ou externos, durante a secagem. Esses modelos são divididos em três categoriais: teóricos, empíricos e semi-empíricos (ERTEKIN e FIRAT, 2017; PEREIRA et al., 2017; RAHMAN et al., 2018). Enquanto os modelos teóricos ou difusivos consideram não apenas as condições externas (condições de contorno), mas também o mecanismo de resistência à transferência de água dentro do produto, baseado, principalmente, na segunda Lei de Fick, modelos empíricos e semi-empíricos consideram, em condições isotérmicas, apenas a resistência externa à transferência de água entre o produto e o ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; AKPINAR e BICER, 2006; ERBAY e ICIER, 2010; KUCUK et al., 2014; SANTOS D et al., 2019).

A precisão e exatidão da previsão da cinética de secagem e, portanto, dos valores das propriedades físicas que regem os fenômenos de transporte de água dentro do produto e deste para o ar de secagem dependem da qualidade de ajuste do modelo aos dados experimentais (CASTRO et al., 2018). A validação do modelo pode ser verificada com diferentes parâmetros estatísticos (GOMES et al., 2018), contudo, em geral, o modelo que melhor descreve a curva de secagem do produto é aquele que apresenta os valores mais altos do coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e/ou eficiência de modelagem e os valores mais baixos de qui-quadrado, erro quadrático médio, erro médio percentual relativo, erro médio de polarização, erro padrão, erro absoluto médio, soma residual de quadrados, resíduos e/ou desvio padrão (ERBAY e ICIER, 2010; KUCUK et al., 2014; ERTEKIN e FIRAT, 2017).

Numerosos estudos investigaram a cinética de secagem de diferentes subprodutos agroindustriais para determinar o coeficiente de difusividade de água e o modelo matemático, difusivo e/ou empírico, que melhor representa o seu processo de secagem

(GARAU et al., 2006; VIJAYARAJ et al., 2007; SUN et al., 2007; WANG et al., 2007a,b; CELMA et al., 2009; AL-MUHTASEB et al., 2010; VEGA-GÁLVEZ et al., 2010; DOYMAZ, 2011; KUMAR et al., 2011; MEZIANE, 2011; PERUSSELLO et al., 2012; CHIMPLEE e KLINKESORN, 2015; KARA e DOYMAZ, 2015; CRUZ et al., 2016; KOUKOUCH et al., 2017; MULITERNO et al., 2017; SANTOS et al., 2017; ANABEL et al., 2018; GUIMARÃES et al., 2018; CUEVAS et al., 2019). Contudo, no que diz respeito ao resíduo de cumbeba, não há estudos sobre o seu comportamento de secagem em diferentes temperaturas e tratamentos.

2.5. Influência da secagem no conteúdo de bioativos

Durante a secagem convectiva, alterações nos parâmetros de qualidade como propriedades sensoriais (DEMIRAY e TULEK, 2015; VEGA-GÁLVEZ et al., 2015; RAMOS et al., 2017), nutricionais (CHEN et al., 2017) e nos compostos bioativos (TELLO-IRELAN et al., 2011; NAKAGAWA et al., 2016; RAMOS et al., 2017) do produto seco, em comparação com o fresco, são observadas. Contudo, em geral, a extensão e a direção, positiva ou negativa, dessas alterações dependem de fatores como temperatura e/ou tempo de secagem (ALEAN et al., 2016; GUPTA et al., 2011; NAKAGAWA et al., 2016), tipo de material ou composto químico específico (AZEVEDO et al., 2014; GÜMÜŞAY et al., 2015; MPHABLELE et al., 2016; RAHMAN et al., 2018), pré-tratamento aplicado (SLEDZ et al., 2016; TAO et al., 2016), entre outros.

Azeeza et al. (2019) observaram que o conteúdo fenólico e atividade antioxidante de fatias de tomate aumentaram com o aumento da temperatura de secagem (50-70 °C), mas diminuíram em função do tempo, por sua vez, o conteúdo de licopeno não sofreu influência significativa da temperatura ($p > 0,05$), contudo aumentou com o tempo de secagem, enquanto os conteúdos de flavonoides e β -caroteno reduziram tanto com o aumento da temperatura quanto com o tempo de secagem.

Romdhane et al. (2015) verificaram que, seja qual for a temperatura entre 40 e 60 °C, a secagem convectiva de cascas de limão resultou em uma redução significativa ($p < 0,05$) dos teores de fenólicos totais e flavonoides em comparação com o material fresco, com uma redução máxima de 72 e 20%, respectivamente.

Albanese et al. (2014) observaram que a secagem convectiva (50 °C) de casca de tomate resultou em teores de licopeno e β -caroteno de 234 e 28 mg/kg, respectivamente, pouco inferior aos obtidos por liofilização (250 e 43 mg/kg, respectivamente).

Mphahlele et al. (2016), no entanto, não observaram diferenças significativas nos compostos fenólicos totais e flavonoides em casca de romã secas em diferentes temperaturas (40-60 °C). Por outro lado, Başlar et al. (2014) descobriram que os conteúdos de compostos fenólicos totais, antocianinas e flavonoides, bem como a capacidade antioxidante foram maiores em arilos de romã secos na maior temperatura de secagem (75 °C). Cruz et al. (2016), também mediram um aumento do potencial bioativo para a casca de uva como consequência da secagem convectiva em alta temperatura (70 °C).

A secagem convectiva de materiais biológicos promove desvios na quantidade associados à sensibilidade do composto ao aquecimento, levando á diferentes transformações químicas nos compostos bioativos, podendo, em certos casos, ocorrer tanto a degradação quanto a síntese de novos compostos com atividade antioxidante (KAO et al., 2011; IGUAL et al., 2012), o que pode levar a dificuldades na interpretação dos resultados. Portanto, entender como as condições de secagem influenciam a qualidade final do produto seco, em comparação com o fresco, torna-se indispensável para uma melhor compreensão do processo de secagem e futura aplicação do resíduo de cumbeba para a extração de compostos com princípios ativos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local de realização dos experimentos

O presente estudo foi desenvolvido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

3.2. Resíduo do processamento da cumbeba

Exemplares de cumbebas (*Tacinga inamoena*), colhidos no município de Afogados da Ingazeira, PE, Brasil (7° 45' 3" S 37° 38' 20" W), foram transportados em recipientes de poliestireno expandido até o Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, PB, Brasil. Os frutos maduros, com cor da casca amarela-alaranjada (Figura 3.1), que não apresentavam defeitos e/ou danos, foram lavados com detergente neutro e escova com cerdas macias para eliminação dos gloquídios (espinhos) e sanitizados por imersão em solução clorada (100 mg/kg) por 20 min; posteriormente, foram enxaguados com água potável para retirar o excesso da solução de sanitização e depois passados em despolpadeira industrial em aço inoxidável (Laboremus, Brasil), no qual o resíduo do processamento de cumbeba foi coletado e utilizado como matéria-prima neste estudo. Esse resíduo foi homogeneizado para garantir uma distribuição uniforme nas proporções de cascas, polpa residual e sementes. Foi embalado em sacos de polietileno de baixa densidade com capacidade de 1,0 kg e imediatamente armazenado em freezer (HVF-301S; Hesstar, Brasil) a -18 °C, em que permaneceu até a realização dos ensaios experimentais.

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 3. 1. (a) Cumbebas em diferentes estádios de maturação e (b) destaque para a cumbeba cortada transversalmente, com suas partes constituintes

3.3. Aditivos e reagentes

Foram utilizados como agentes espumantes o emulsificante Emustab e o estabilizante Liga Neutra, ambos produtos comerciais da marca Du Porto®.

Reagente Folin-Ciocalteu, etanol, ácido gálico e o carbonato de sódio foram adquiridos da Sigma Aldrich (St. Louis, Missouri, EUA). Todos esses reagentes eram de grau analítico.

3.4. Secagem convectiva do resíduo

Antes dos experimentos de secagem, o resíduo de cumbeba foi descongelado sob refrigeração (4 °C/24 h), mantido em bancada do laboratório (25 °C/2 h) para equilíbrio da temperatura com o ambiente e submetido (ou não) a processo de pré-tratamento, de forma que se obteve três grupos de amostras: 1) resíduo não tratado/integral; 2) resíduo triturado e 3) resíduo na forma de espuma. O resíduo não tratado/integral foi seco sem qualquer pré-tratamento. Para o resíduo triturado, no processo de pré-tratamento de trituração, o resíduo integral foi triturado em um processador doméstico por 5 min na velocidade de rotação máxima. Para o resíduo na forma de espuma, a fim de facilitar a incorporação e homogeneização dos agentes espumante/estabilizante, o resíduo foi triturado juntamente com água destilada na proporção de 2:1 (resíduo: água, m/m) por 5 min, obtendo-se uma pasta e, nesse caso, com fragmentos de casca e sementes dispersos nesta massa, a qual se incorporou o emulsificante (2,5 g/100 g de pasta) e o estabilizante (1,5 g/100 g de pasta) e, então, procedeu-se a homogeneização em um agitador (marca Arno 250 W) durante 15 min.

As amostras de resíduo (integral, triturado e espuma) foram distribuídas em bandejas circulares de alumínio ($84,45 \pm 0,61$ mm de diâmetro) aplicando leve pressão para formar placas planas de espessura uniforme de $9,56 \pm 0,44$ mm (Figura 3.2), e conduzidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar (Fanem, modelo 320, Brasil), em quatro temperaturas (50, 60, 70 e 80 °C) e velocidade do ar constante em 1,5 m/s (fluxo paralelo às amostras). Antes dos experimentos de secagem, para garantir que a condição de estado estacionário fosse alcançada, a temperatura da estufa foi ajustada e mantida por 60 min antes da inserção das amostras na câmara de secagem. As massas das amostras durante os experimentos foram determinadas em intervalos de tempo de 5, 10, 20, 30 e 60 min, em uma balança digital com precisão de 0,01 g (Marte, modelo AS5500C, Brasil), levando-se menos de 1min para pesar as amostras. Os experimentos de secagem foram realizados até que as amostras atingissem massa constante, isto é, quando não houve variação na massa por três medidas consecutivas, que foi assumido como estado de equilíbrio dinâmico. Para obter melhor reprodutibilidade, todos os experimentos de secagem foram realizados em seis repetições. Os resíduos secos foram retirados das bandejas e triturados em processador doméstico (Black Decker, modelo HC31X-Tipo 2, 120 W, China), em intervalos de alguns segundos para evitar o estresse térmico do material, resultando em pós que, então, foram embalados (embalagem laminada) e armazenados a - 18 °C para análise posterior.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3. 2. Resíduo integral (esquerda), triturado (centro) e na forma de espuma (direita)

3.5. Análise de dados da secagem

Os dados da massa do resíduo de cumbeba, em diferentes intervalos de tempo, para as diferentes condições de secagem (temperatura e tratamento) foram convertidos em dados de teor de água (b.s.). A razão de teor de água (RX) foi calculada a partir dos

valores do teor água inicial, teor de água em diferentes intervalos de tempo e do teor de água de equilíbrio, de acordo com a Equação 3.1:

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.1)$$

em que: X_t , X_0 e X_e são teor de água em um tempo t (g de água/g de matéria seca), teor de água inicial (g de água/g de matéria seca) e teor de água de equilíbrio (g de água/g de matéria seca), respectivamente.

3.5.1. Taxa de secagem

A taxa de secagem (TX) das amostras foi calculada usando a Equação 3.2 (AKTAŞ et al., 2016; ÖZDEMIRA et al., 2017):

$$TX = \frac{X_t - X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.2)$$

em que: $X_{t+\Delta t}$, X_t e Δt são o teor de água em $t + \Delta t$ (g de água/g de matéria seca), o teor de água em t (g de água/g de matéria seca) e a diferença entre o tempo atual (t) e o tempo anterior (t_0) de secagem (min), respectivamente. O comportamento de secagem foi determinado usando um gráfico da taxa de secagem em função do tempo.

3.5.2. Modelagem matemática da cinética de secagem

Para modelar os dados experimentais, dez modelos de secagem em camada fina foram escolhidos e estão detalhados na Tabela 3.1. Os modelos foram ajustados usando-se o *software* Statistica® versão 7.0, através de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton (STATSOFT INC, TULSA, EUA, 2007).

Tabela 3. 1. Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos

n° Modelo	Modelo	Equação	Referência
1	Newton	$RX = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
2	Page	$RX = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
3	Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-kt)$	Henderson e Pabis (1961)
4	Exponencial de Dois Termos	$RX = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Sharaf-Eldeen et al. (1980)
5	Thompson	$RX = \exp(-a(a^2+4bt)^{0.5}/2b)$	Thompson et al. (1968)
6	Logarítmico	$RX = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu et al. (1999)
7	Aproximação da Difusão	$RX = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Sharaf-Eldeen et al. (1980)
8	Henderson e Pabis Modificado	$RX = a \exp(-kt) + b \exp(-kt) + c \exp(-kt)$	Karathanos (1999)
9	Dois Termos	$RX = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Henderson (1974)
10	Midilli	$RX = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002)

RX - razão de teor de água (adimensional); a, b, c, k, k₀, k₁, n - coeficientes dos modelos; t - tempo de secagem (min)

A qualidade de ajuste de cada modelo aos dados experimentais foi verificada usando o coeficiente de determinação (R^2) (Equação 3.3), o desvio quadrático médio (DQM) (Equação 3.4) e o qui-quadrado (χ^2) (Equação 3.5). O melhor modelo é aquele que apresenta o maior valor de R^2 e os menores valores de DQM e χ^2 (ERBAY e ICIER, 2010; KUCUK et al., 2014).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(RX_{exp,i} - \overline{RX}_{exp,i})(RX_{pred,i} - \overline{RX}_{pred,i})]^2}{\sum_{i=1}^N (RX_{exp,i} - \overline{RX}_{exp,i})^2 \sum_{i=1}^N (RX_{pred,i} - \overline{RX}_{pred,i})^2} \quad (3.3)$$

$$DQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2 \quad (3.4)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2 \quad (3.5)$$

em que: $RX_{exp,i}$, $\overline{RX}_{exp,i}$, $R_{pred,i}$, $\overline{RX}_{pred,i}$, N e n são a razão de teor de água experimental, média da razão de teor de água experimental, razão de teor de água predita pelo modelo, média da razão de teor de água predita pelo modelo, número de observações e número de coeficientes (constantes) do modelo, respectivamente.

3.5.3. Equação de difusão ou equação governante

Para descrever um processo de secagem, a equação de difusão unidimensional para uma placa plana infinita pode ser escrita na forma da Equação 3.6 (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x}) \quad (3.6)$$

em que: X é o teor de água em base seca (b.s.), D_{ef} é a difusividade efetiva de água (m^2/s), t é o tempo (s) e x é a coordenada cartesiana da posição (m). A Equação 3.6 foi resolvida para descrever a secagem do resíduo de cumbeba considerando as seguintes premissas: (1) ausência de contração do volume durante a secagem; (2) distribuição inicial de água uniforme; (3) a difusão é o único mecanismo de transporte de água dentro do resíduo; (4) o resíduo é considerado homogêneo e isotrópico; (5) a difusividade efetiva de água não varia durante o processo; (6) o coeficiente convectivo de transferência de massa é constante durante a difusão; e (7) o processo é considerado isotérmico. Diferentes suposições resultam em diferentes soluções da Equação 3.6; portanto, no presente estudo, três modelos foram utilizados para descrever o processo de secagem convectiva e suas soluções são apresentadas a seguir.

3.5.3.1. Modelo 1: Solução analítica para a equação de difusão considerando condição de contorno do terceiro tipo ou convectiva

A condição de contorno do terceiro tipo é expressa assumindo que o fluxo difusivo de massa interno no contorno do produto é igual ao fluxo convectivo externo nas proximidades deste contorno. Assim, para uma placa plana infinita, essa imposição resulta na Equação 3.7:

$$-D_{ef} \left. \frac{\partial X(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\pm L/2} = h \left[X(x, t) \Big|_{x=\pm L/2} - X_{eq} \right] t > 0 \quad (3.7)$$

Na Equação 3.7, h é o coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s); $X(x, t)$ é o valor do teor de água na posição x no instante t ; X_{eq} é o teor de água de equilíbrio; enquanto L é a espessura da placa plana infinita (m). Para as premissas mencionadas anteriormente (seção 3.5.3), com o valor inicial de água indicado por X_0 e a condição de contorno definida pela Equação 3.7, a solução analítica $X(x, t)$ da Equação 3.6 é dada pela Equação 3.8 (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$X(x, t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \times \cos\left(\mu_n \frac{x}{L/2}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} D_{ef} t\right) \quad (3.8)$$

em que: a origem do eixo x está localizada no ponto central da placa infinita.

Na Equação 3.8, o coeficiente A_n é dado pela Equação 3.9:

$$A_n = \frac{4 \sin \mu_n}{2\mu_n + \sin(2\mu_n)} \quad (3.9)$$

em que: μ_n são as raízes da equação característica para uma placa infinita (Equação 3.10):

$$\cot \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi} \quad (3.10)$$

Na Equação 3.10, Bi é o número Biot de transferência de massa, dado pela Equação 3.11:

$$Bi = \frac{hL/2}{D_{ef}} \quad (3.11)$$

em que: L é o comprimento característico. A expressão para determinar o teor de água média, $\bar{X}(t)$, em um instante t , é dada pela equação 3.12:

$$\bar{X}(t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} D_{ef} t\right) \quad (3.12)$$

em que: o parâmetro B_n é dado por (Equação 3.13):

$$B_n = \frac{2Bi^2}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} \quad (3.13)$$

A Equação 3.13 é uma equação transcendental que pode ser resolvida para um número Biot de transferência de massa especificado. As primeiras 16 raízes da Equação 3.10 foram calculadas para 469 valores especificados de número de Biot de transferência de massa, de $Bi = 0$ (que corresponde a uma resistência infinita ao fluxo de água na superfície) a $Bi = 200$ (que praticamente corresponde a condição de contorno de equilíbrio). Como observação final desta seção, ressalte-se que na literatura é comum encontrar a Equação 3.12 reescrita para expressar o valor da razão de teor de água, que é dada pela Equação 3.14:

$$RX(t) = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{(X_0 - X_{eq})} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} D_{ef} t\right) \quad (3.14)$$

3.5.3.2. Modelo 2: Condição de contorno de primeiro tipo ou prescrita

Para a condição de contorno de primeiro tipo, uma condição de equilíbrio na superfície da amostra (resíduo) foi assumida, de modo que o conteúdo de água na superfície seja igual ao do equilíbrio. Dessa forma, para uma placa plana infinita, essa imposição resulta na Equação 3.15:

$$X|_{x=\pm L/2} = X_{eq}, t > 0 \quad (3.15)$$

Para uma placa plana infinita homogênea de espessura L com distribuição do teor de água inicialmente uniforme ($t = 0, X = X_0, 0 \leq x \leq L$) e teor de água de equilíbrio X_{eq} , as soluções da Equação 3.6 também são dadas pelas Equações 3.8 e 3.12; no entanto, nesse caso, em que o número Biot de transferência de massa tende ao infinito, característico da condição de contorno do primeiro tipo ($Bi \gg 0$), a Equação 3.10 é dada pela Equação 3.16 (SILVA et al., 2014b):

$$\cot \mu_n = 0 \quad (3.16)$$

e, como consequência, μ_n é dado pela Equação 3.17:

$$\mu_n = \frac{\pi(2n-1)}{2} \quad (3.17)$$

Com $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$. Assim, o coeficiente A_n (Equação 3.9) é definido e o teor de água local a qualquer instante, $X(x, t)$, pode ser calculado pela Equação 3.12. Por outro lado, quando o número Biot de transferência de massa tende ao infinito B_n , calculado com a Equação 3.13, é redefinido conforme a Equação 3.18:

$$B_n = \frac{2}{\mu_n} \quad (3.18)$$

Com o coeficiente B_n calculado pela Equação 3.18 o teor médio de água no instante t , $\bar{X}(t)$, é dado na forma da Equação 3.19 (LUIKOV, 1968):

$$\bar{X}(t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2}] \quad (3.19)$$

em que: $\bar{M}(t)$ é o teor de água médio (b.s.) no tempo t , X_{eq} é o teor de água para $t \gg 0$; X_0 é o teor de água em $t = 0$, D_{ef} é a difusividade efetiva de água (m^2/s), t é o tempo (s) e

L é a espessura da placa infinita (m). Da Equação 3.19, a razão de teor de água adimensional é calculada na forma da Equação 3.20:

$$RX(t) = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{(X_0 - X_{eq})} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2}] \quad (3.20)$$

3.5.3.3. Modelo 3: Primeiro termo da série infinita

O modelo 3 é unidimensional, desconsidera resistência externa, e assume que a forma geométrica da amostra (resíduo) é de uma placa plana infinita (área >> espessura). A solução analítica unidimensional da Equação 3.6 para essas condições, em termos da razão de teor de água adimensional, isto é, a Equação 3.20, é simplificada para apenas o primeiro termo da série, que segue a abordagem empregada em vários estudos sobre secagem de resíduos agroindústrias (HENRÍQUEZ et al., 2014; KARA e DOYMAZ, 2015; ZHAO et al., 2016; GALAZ et al., 2017; WILKINS et al., 2018; BADAoui et al., 2019). Nesse caso, a Equação 3.20 é reescrita na forma da Equação 3.21:

$$RX(t) = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{(X_0 - X_{eq})} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2}) \quad (3.21)$$

3.5.3.4. Simulação computacional: determinação de D_{ef} e h

Como mencionado anteriormente (seção 3.5.3.), diferentes modelos são testados para se determinar o melhor modelo para a descrição da secagem do resíduo de cumbeba, considerando-se relativamente precisos na previsão dos dados experimentais de acordo com os valores do coeficiente de determinação (R^2) e do qui-quadrado (χ^2) das simulações, utilizados como critérios de ajuste (ERBAY e ICIER, 2010; KUCUK et al., 2014).

As simulações são realizadas, no caso da condição de contorno convectiva (modelo 1), no *software* Convective Adsorption–Desorption versão 3.2 (Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil), e para a condição de contorno de equilíbrio (modelo 2), no *software* Prescribed Adsorption–Desorption versão 2.2 (Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil), que são *softwares* prontos para uso que determinam os parâmetros de transporte, ou seja, os valores ótimos para D_{ef} e h usando

um otimizador acoplado a solução analítica da equação de difusão, através de dados experimentais conhecidos.

Basicamente, o otimizador varre todo o domínio dos valores da difusividade (D_{ef}) e/ou do número Biot de transferência de massa (Bi) e encontra o mínimo para a função objetivo $\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\overline{RX}_i^{exp} - \overline{RX}_i^{ana}(D_{ef}, Bi) \right]^2 \frac{1}{\sigma_i^2}$, que é o qui-quadrado (χ^2), definido conforme Bevington e Robinson (1992) e Taylor (1997). Como as incertezas associadas aos pontos experimentais (σ_i) não foram determinadas inicialmente e, portanto, eram desconhecidas, $\sigma_i = 1$ foi atribuído a todos os pontos experimentais e, dessa forma, o mesmo peso estatístico $1/\sigma_i^2 = 1$ para todos eles.

Como informação adicional, os otimizadores acoplados às soluções analíticas foram desenvolvidos em um computador Intel Pentium IV com 2 GB (RAM). Os códigos-fonte foram compilados pelo Compaq Visual Fortran (CVF) 6.6.0 Professional Edition, usando a opção de programação QuickWin Application sob a plataforma Windows Vista. O critério de convergência estipulado para a determinação da difusividade para cada número de Biot de transferência de massa especificado foi 1×10^{-15} . Os *softwares* empregados neste trabalho estão disponíveis para avaliação em <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convective.htm> (Convective) e <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm> (Prescribed). Os gráficos que mostram a cinética de secagem, parametrizada em termos da razão de teor de água, também foram desenhados pelos *softwares* empregados para determinar D_{ef} e/ou h e simular o processo. Observou-se que especificidades em relação à implementação computacional, como questões mais técnicas de programação (algoritmo de otimização dos parâmetros de transporte, D_{ef} e, portanto, h), não estão no escopo do estudo e, portanto, não são abordadas com profundidade no texto. Para maiores informações sobre o desenvolvimento dos *softwares* empregados neste trabalho recomenda-se os trabalhos de Silva W et al. (2009) e Silva et al. (2010) e suas referências.

Como observação final desta seção, destaca-se que os *softwares* empregados na simulação utilizam para a solução da equação de difusão (Equação 3.6), além das suposições descritas na seção 3.5.3, uma condição de simetria axial ($t > 0$; $0 \leq r \leq R$; $\partial M/\partial x|_{x=L/2} = 0$), como consequência, consideram que a origem do sistema de referência (eixo x) está localizada no ponto central da placa plana infinita ($x = L/2$). Contudo, isso não está em afinidade com a realidade física da secagem do resíduo de cumbeba, porque a origem de seu sistema de referência está localizada na interface bandeja de alumínio-

resíduo ($x = 0$). Assim, para superar esse problema, sem a necessidade da implementação de novos códigos-fonte, foi necessário, apenas, dobrar o valor da espessura da amostra, pois com este artifício faz-se o ponto central da placa infinita, durante a execução da solução da equação de difusão, coincidir com a origem do eixo x ($x = 0$) do problema real.

Para o modelo 3, uma regressão não linear simples tornou possível determinar a difusividade efetiva de água (D_{ef}). A simulação foi realizada no *software* Statistica® versão 7.0 (STATSOFT® INC, TULSA, EUA, 2007).

3.5.3.5. Equações do tipo Arrhenius: energia de ativação

Para relacionar a difusividade efetiva de água (D_{ef}) e a temperatura (T) de secagem, uma equação do tipo Arrhenius (Equação 3.22) pode ser usada (SILVA et al., 2012; GUINÉ et al., 2012; TZEMPELIKOS et al., 2015; PILATTI et al., 2016):

$$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273,15)}\right) \quad (3.22)$$

Na Equação 3.22, D_o é o fator pré-exponencial (m^2/s), E_a é a energia de ativação (J/mol); R é a constante universal dos gases ($8,314 J/mol K$) e T é a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}C$). Uma equação do tipo Arrhenius (Equação 3.23) também pode ser usada para relacionar o coeficiente convectivo de transferência de massa (h) e a temperatura de secagem (T) (SILVA et al., 2013abc; SILVA et al., 2014b):

$$h = A \exp\left(-\frac{B}{R(T+273,15)}\right) \quad (3.23)$$

em que A e B são parâmetros de ajuste.

3.6. Análises químicas

3.6.1. Compostos fenólicos totais

O conteúdo de compostos fenólicos totais (CFT) foi determinado de acordo com o método micro Folin-Ciocalteu adaptado por Waterhouse (2006), que utiliza o reagente Folin-Ciocalteu, carbonato de sódio, metanol e ácido gálico para obtenção da curva padrão. Primeiro, pesou-se 1,0 g da amostra e adicionou-se aos poucos 50 mL de água destilada, macerando-se até completa homogeneização. A mistura foi deixada em repouso, em temperatura ambiente (25 ± 2 °C), durante 30 min, em sala escura; logo após, foi filtrada e adicionou-se o reagente de Folin-Ciocalteu fenol (125 µL) seguido de agitação vigorosa e repouso por 5 min. Após o tempo de reação, 250 µL de solução aquosa de carbonato de sódio (Na_2CO_3) (20 g/100 g de solução) foi adicionado, seguido de nova agitação e repouso em banho-maria a 40 °C, por 30 min. Um branco de reagente foi preparado usando água destilada, reagente de Folin-Ciocalteu fenol e solução de carbonato de sódio. A absorbância do extrato foi medida a 765 nm utilizando um espectrofotômetro UV/Visível (Coleman, modelo 35-D, Brasil). O resultado foi expresso em mg de equivalente de ácido gálico (EAG)/100 g de matéria seca, calculado através da Equação 3.24. A curva padrão foi obtida variando-se a concentração da solução de ácido gálico entre 0 e 22,5 µg/mL ($R^2 = 0,9994$). A análise foi realizada em quadruplicata.

$$\text{CFT} = \frac{(A - b) \times V_e}{10 \times a \times m \times V_d} \quad 3.24$$

em que: A é a absorbância medida, a é o coeficiente angular da equação da curva padrão, b é o coeficiente linear da equação da curva padrão, m é a massa da amostra seca (g), V_e é o volume do extrato (mL) e V_d é o volume da diluição (mL).

3.6.2. Flavonoides e antocianinas

Os conteúdos de flavonoides totais (FT) e antocianinas totais (AT) foram determinados segundo a metodologia descrita por Francis (1982), em que pesou-se 1,0 g da amostra, adicionou-se 10 mL da solução de etanol-HCl (1,5 N) na proporção 85:15 (v:v), macerou-se por 1 min, recolheu-se o extrato em um tubo de ensaio, guardando-o sob refrigeração (5 °C) por 24 h. Após este período, filtrou-se o extrato em algodão e fez-

se a leitura em espectrofotômetro UV/Visível (Coleman, modelo 35-D, Brasil) a 374 nm para flavonoides e 535 nm para antocianinas. Os resultados foram expressos em mg/100 g de matéria seca, calculados utilizando as Equações 3.25 e 3.26. A análise foi realizada em quadruplicata.

$$FT = \frac{A \times F_d}{76,6} \quad (3.25)$$

$$AT = \frac{A \times F_d}{98,2} \quad (3.26)$$

em que: A é a absorvância medida e F_d é o fator de diluição do extrato, calculado conforme a Equação (3.27).

$$F_d = \frac{100 \times V}{m} \quad (3.27)$$

em que: m é a massa da amostra seca (g) e V o volume da diluição (mL).

3.6.3. *Betalainas*

As betalaínas (betaxantinas e betacianinas) foram determinadas de acordo com Castellar et al. (2003) com algumas adaptações. Os extratos foram preparados utilizando solução de etanol: água na proporção 80:20 (v:v) como solvente de extração. Aproximadamente 1,0 g de amostra foi macerada em 10 mL de etanol a 80%, então foi agitada e, em seguida, armazenada sob refrigeração (5 °C) por 24 h. Após este período, a mistura foi centrifugada a 4 °C e 3.500 rpm durante 10 min. Em seguida, recolheu-se o sobrenadante em uma proveta e a parte insolúvel foi reextraída com mais 10 mL de etanol a 80%, que foi submetido ao mesmo procedimento descrito anteriormente. Os dois sobrenadantes foram combinados e o volume final ajustado para 25 mL com etanol a 80%; por fim, o extrato foi novamente submetido à agitação. As absorvâncias dos extratos foram medidas em espectrofotômetro UV/Visível (Coleman, modelo 35-D, Brasil) a 480 nm para betaxantinas e 535 nm para betacianinas. Os resultados foram expressos em mg/100 g de matéria seca, calculados de acordo com a Equação 3.28. A análise foi realizada em quadruplicata.

$$\text{Betax. ou Betac.} = \frac{A \times F_d \times \text{PM} \times V \times 100}{\epsilon \times L \times m} \quad (3.28)$$

em que: A é a absorvância medida a 480 nm (betaxantinas) ou 535 nm (betacianinas), F_d é o fator de diluição do extrato, PM é o peso molecular (308 e 550 g/mol para betaxantinas e betacianinas, respectivamente), V é o volume do extrato (L), ϵ é o coeficiente de extinção (48.000 e 60.000 L/mol cm para betaxantinas e betacianinas, respectivamente), L é a largura da curva do espectrofotômetro (1 cm) e m é a massa seca da amostra (g).

3.6.4. Análise estatística dos dados

Todas as experiências foram realizadas em pelo menos quatro repetições. Os resultados foram expressos como a média \pm desvio padrão. Para a análise estatística dos resultados, foi utilizada a análise variância (ANOVA) e o teste de Tukey para identificar diferenças significativas entre as médias ($p > 0,05$). Os dados foram tratados no *software* Statistica® 7.0 (STATSOFT® INC, TULSA, EUA, 2007).

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDENNACER, B.; KARIM, M.; YASSINE, M.; NESRINE, R.; MOUNA, D.; MOHAMED, B. Determination of phytochemicals and antioxidant activity of methanol extracts obtained from the fruit and leaves of Tunisian *Lycium intricatum* Boiss. **Food Chemistry**, v.174, p.577-584, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.114>

AHMAD-QASEM, M. H.; AHMAD-QASEM, B. H.; BARRAJÓN-CATALÁN, E.; MICOL, V.; CÁRCEL, J. A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V. Drying and storage of olive leaf extracts. Influence on polyphenols stability. **Industrial Crops and Products**, v.79, p.232-239, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.006>

AHMAD-QASEM, M. H.; BARRAJÓN-CATALÁN, E.; MICOL, V.; MULET, A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V. Influence of freezing and dehydration of olive leaves (var. Serrana) on extract composition and antioxidant potential. **Food Research International**, v.50, p.189-196, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.10.028>

AIRES, A.; CARVALHO, R.; SAAVEDRA, M. J. Valorization of solid wastes from chestnut industry processing: Extraction and optimization of polyphenols, tannins and ellagitannins and its potential for adhesives, cosmetic and pharmaceutical industry. **Waste Management**, v.48, p.457-464, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.019>

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Mathematical Modeling and Experimental Study on Thin Layer Drying of Strawberry. **International Journal of Food Engineering**, v.2, n.1, 2006. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1045>

AKTAŞ, M.; ŞEVIK, S.; AMINI, A.; KHANLARI, A. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. **Solar Energy**, v.137, p.500-515, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.036>

AL-MUHTASEB, A. H.; AL-HARAHSEH, M.; HARARAH, M.; MAGEE, T. R. A. Drying characteristics and quality change of unutilized-protein rich-tomato pomace with

and without osmotic pre-treatment. **Industrial Crops and Products**, v.31, p.171-177, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.002>

ALADEDUNYE, F.; PRZYBYLSKI, R.; NIEHAUS, K.; BEDNARZ, H.; MATTHÄUS, B. Phenolic extracts from *Crataegus × mordenensis* and *Prunus virginiana*: Composition, antioxidant activity and performance in sunflower oil. **LWT - Food Science and Technology**, v.59, n.1, p.308-319, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.002>

ALEAN, J.; CHEJNE, F.; ROJANO, B. Degradation of polyphenols during the cocoa drying process. **Journal of Food Engineering**, v.189, p.99-105, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.026>

ALBANESE, D.; ADILETTA, G.; D'ACUNTO, M.; CINQUANTA, L.; DI MATTEO, M. Tomato peel drying and carotenoids stability of the extracts. **International Journal of Food Science and Technology**, v.49, p.2458–2463, 2014. <http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.12602>.

ALLISON, B. J.; SIMMONS, C. W. Valorization of tomato pomace by sequential lycopene extraction and anaerobic digestion. **Biomass and Bioenergy**, v.105, p.331-341, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.019>

AL-MATHAL, E. M.; ALSALEM, A. M. Pomegranate (*Punica granatum*) peel is effective in a murine model of experimental *Cryptosporidium parvum*. **Experimental Parasitology**, v.131, p. 350-357, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2012.04.021>

AL-MEGRIN, W. A. In vivo study of pomegranate (*Punica granatum*) peel extract efficacy against *Giardia lamblia* in infected experimental mice. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v.7, p.59-63, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2016.08.018>

ANABEL, F.; CELIA, R.; GERMÁN, M.; ROSA, R. Determination of effective moisture diffusivity and thermodynamic properties variation of regional wastes under different atmospheres. **Case Studies in Thermal Engineering**, v.12, p.248-257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.015>

ARLENE, A. A.; PRIMA, K. A.; UTAMA, L.; ANGGRAINI, S. A. The preliminary study of the dye extraction from the avocado seed using ultrasonic assisted extraction. **Procedia Chemistry**, v.16, p.334-340, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.12.061>

ASHTIANI, S-H. M.; SALARIKIA, A.; GOLZARIAN, M. R. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. **Information Processing in Agriculture**, v.4, p.128-139, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.03.001>

AYALA-ZAVALA, J. F.; ROSAS-DOMÍNGUEZ, C.; VEGA-VEGA, V.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. Antioxidant enrichment and antimicrobial protection of fresh-cut fruits using their own byproducts: Looking for integral exploitation. **Journal of Food Science**, v.25, p.175-181. 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01792.x>

AYALA-ZAVALA, J. F.; VEGA-VEJA, V.; ROSAS-DOMÍNGUEZ, C.; PALAFOX-CARLOS, H.; VILLA-RODRIGUEZ, J. A.; SIDDIQUI, M. W.; DÁVILA-AVIÑA, J. E.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. **Food Research International**, v.44, p.1866-1874, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.021>

AZEVÊDO, J. C. S.; BORGES, K. C.; GENOVESE, M. I.; CORREIA, R. T. P.; VATTEM, D. A. Neuroprotective effects of dried camu-camu (*Myrciaria dubia* HBK McVaugh) residue in *C. elegans*. **Food Research International**, v.73, p.135-141, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.02.015>

AZEVÊDO, J. C. S.; FUJITA, A.; OLIVEIRA, E. L.; GENOVESE, M. I.; CORREIA, R. T. P. Dried camu-camu (*Myrciaria dubia* H.B.K.McVaugh) industrial residue: A bioactive-rich Amazonian powder with functional attributes. **Food Research International**, v.62, p.934-940, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.018>

AZEEZA, L.; ADEBISI, S. A.; OYEDEJI, A. O.; ADETORO, R. O.; TIJANI, O. K. Bioactive compounds contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time. **Journal of the Saudi Society of**

Agricultural Sciences, v.18, p.120-126, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.03.002>

BADAOU, O.; HANINI, S.; DJEBLI, A.; HADDAD, B.; BENHAMOU, A. Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models. **Renewable Energy**, v.133, p.144-155, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.020>

BARROS, H. D. F. Q.; BASEGGIO, A. M.; ANGOLINI, C. F. F.; PASTORE, G. M.; CAZARIN, C. B. B.; MAROSTICA-JUNIOR, M. R. Influence of different types of acids and pH in the recovery of bioactive compounds in Jabuticaba peel (*Plinia cauliflora*). **Food Research International**, v.124, p.16-26, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.010>

BARROS, R. G. C.; ANDRADE, J. K. S.; DENADAI, M.; NUNES, M. L.; NARAIN, N. Evaluation of bioactive compounds potential and antioxidant activity in some Brazilian exotic fruit residues. **Food Research International**, v.102, p.84-92, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.082>

BAŞLAR, M.; KARASU, S.; KILIÇLI, M.; US, A. A.; SAĞDIÇ, O. Degradation kinetics of bioactive compounds and antioxidant activity of pomegranate arils during the drying process. **International Journal of Food Engineering**, v.10, p.839-848, 2014. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0080>

BEVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K. **Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences**, Second ed. WCB/McGraw-Hill, Boston, 1992.

BIMPILAS, A.; PANAGOPOULOU, M.; TSIMOGIANNIS, D.; OREOPOULOU, V. Anthocyanin copigmentation and color of wine: The effect of naturally obtained hydroxycinnamic acids as cofactors. **Food Chemistry**, v.197, p.39-46, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.095>

BUTSAT, S.; SIRIAMORNPUN, S. Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice. **Food Chemistry**, v.119, p.606-613, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.001>

CAN-CAUICH, C. A.; SAURI-DUCH, E.; BETANCUR-ANCONA, D.; CHEL-GUERRERO, L.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A.; CUEVAS-GLORY, L. F.; PÉREZ-PACHECO, E.; MOO-HUCHIN, V. M. Tropical fruit peel powders as functional ingredients: evaluation of their bioactive compounds and antioxidant activity. **Journal of Functional Foods**, v.37, p.501-506, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.08.028>

ÇAM, M.; CIHATİÇYER, N.; ERDOĞAN, F. Pomegranate peel phenolics: Microencapsulation, storage stability and potential ingredient for functional food development. **LWT - Food Science and Technology**, v.55, n.1, p.117-123, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.09.011>

ÇAM, M.; ERDOĞAN, F.; ASLAN, D.; DINÇ, M. Enrichment of functional properties of ice cream with pomegranate by-products. **Journal of Food Science**, v.78, n.10, p. C1543-C1550, 2013. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12258>

CASTELLAR, M. R.; OBÓN, J. M.; ALACID, M.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. A. Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.51, n.9, p.2772-2776, 2003. <https://doi.org/10.1021/jf021045h>

CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, v.223, p.152-167, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012>

CAVALCANTI, R. N.; VEGGI, P. C.; MEIRELES, M. A. A. Supercritical fluid extraction with a modifier of antioxidant compounds from jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) byproducts: economic viability. **Procedia Food Science**, v.1, p.1672-1678, 2011. <https://doi:10.1016/j.profoo.2011.09.247>

CELMA, A. R.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; BLÁZQUEZ, F. C. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. **Food and Bioproducts Processing**, v.87, p.247-253, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2008.10.005>

CHANG, C. H.; LIN, H. Y.; CHANG, C. Y.; LIU, Y. C. Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v.77, p.478-485, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.061>

CHAURASIYA, R. S.; HEBBAR, U. U. Extraction of bromelain from pineapple core and purification by RME and precipitation methods. **Separation and Purification Technology**, v.111, p.90-97, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.03.029>

CHEL-GUERRERO, L.; BARBOSA-MARTÍNA, E.; MARTÍNEZ-ANTONIO, A.; GONZÁLEZ-MONDRAGÓN, E.; BETANCUR-ANCONA, D. Some physicochemical and rheological properties of starch isolated from avocado seeds. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.86, p.302-308, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.052>

CHEN, Q.; BI, J.; CHEN, R.; LIU, X.; WU, X.; ZHOU, M. Comparative study on drying characteristic, moisture diffusivity, and some physical and nutritional attributes of blanched carrot slices. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.41, p.1-8, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13201>

CHIMPLEE, S.; KLINKESORN, U. Thin-layer drying model of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) kernel and its application in fat extraction process. **International Journal of Food Engineering**, v.11, p.243-253, 2015. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0209>

CONTRERAS-CALDERÓN, J.; CALDERÓN-JAIMES, L.; GUERRA-HERNÁNDEZ, E.; GARCÍA-VILLANOVA, B. Antioxidant capacity, phenolic content and vitamin C in pulp, peel and seed from 24 exotic fruits from Colombia. **Food Research International**, v. 44, p. 2047-2053, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.003>

CORREIA, R. T.; BORGES, K. C.; MEDEIROS, M. F.; GENOVESE, M. I. Bioactive compounds and phenolic-linked functionality of powdered tropical fruit residues. **Food**

Science and Technology International, v.18, p.539-47, 2012.
<https://doi.org/10.1177/1082013211433077>

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Clarendon Press, Oxford, UK, 1992.

CRUZ, L.; CLEMENTE, G.; MULET, A.; AHMAD-QASEM, M. H.; BARRAJÓN-CATALÁN, E.; GARCÍA-PÉREZ, J. V. Air-borne ultrasonic application in the drying of grape skin: kinetic and quality considerations. **Journal of Food Engineering**, v. 168, p.251-258, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.001>

CUEVAS, M.; MARTÍNEZ-CARTAS, M. L.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; HERNÁNDEZ, L.; GARCÍA-MARTÍN, J. F.; SÁNCHEZ, S. Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. **Renewable Energy**, v.132, p.911-920, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.053>

DANTAS, R. L.; SHUNEMANN, A. P.; SILVA, S. M.; MELO, R. S.; SILVA, R. S.; SOUZA, F. A. R. M. Quality and descriptive terminology of *Tacinga inamoena* (k. Schum.) fruits. **Acta Horticulturae (ISHS)**, v.58, p.143-149, 2015a. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.19>

DANTAS, R. L.; SILVA, S. M.; SANTOS, L. F.; DANTAS, A. L.; LIMA, R. P.; SOARES, L. G. Betalains and antioxidant activity in fruits of cactaceae from brazilian semiarid. **Acta Horticulturae (ISHS)**, v.58, 151-157, 2015b. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.20>

DA SILVA, L. M. R.; FIGUEIREDO, E. A. T.; RICARDO, N. M. P. S.; VIEIRA, I. G. P.; FIGUEIREDO, R. W.; BRASIL, I. M.; GOMES, C. L. Quantification of bioactive compounds in pulps and by-products of tropical fruits from Brazil. **Food Chemistry**, v.143, p.398-404, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.001>

DELIA, S-C.; CHÁVEZ, G. M., LEÓN-MARTÍNEZ FRANK, M.; ARACELI, S. P.; IRAIS, A-L.; FRANCO, A-A. Spray drying microencapsulation of betalain rich extracts from *Escontria chiotilla* and *Stenocereus queretaroensis* fruits using cactus mucilage.

Food Chemistry, v.272, p.715-722, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.069>

DEMIRAY, E.; TULEK, Y. Color degradation kinetics of carrot (*Daucus Carota* L.) slices during hot air drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.39, p.800-805, 2015. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12290>

DERAKHSHAN, Z.; FERRANTE, M.; TADI, M.; ANSARI, F.; HEYDARI, A.; HOSSEINI, M.S.; CONTI, G.O.; SADARABAD, E.K. Antioxidant activity and total phenolic content of ethanolic extract of pomegranate peels, juice and seeds. **Food and Chemical Toxicology**, v.114, p.108-111, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.02.023>

DOYMAZ, I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. **Heat and Mass Transfer**, v.53, p.25-35, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8>

DOYMAZ, I. Experimental study on drying characteristics of pomegranate peels. **Food Science and Biotechnology**, v.20, n.4, p.965-970, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10068-011-0133-3>

DOYMAZ, I. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. **International Journal of Food Science and Technology**, v.48, p.1909-1915, 2013. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12170>

DROSOU, C.; KYRIAKOPOULOU, K.; BIMPILAS, A.; TSIMOGIANNIS, D.; KROKIDA, M. A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts. **Industrial Crops and Products**, v.75, Part B, p.141-149, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.063>

EH, A. L. S.; TEOH, S. G. Novel modified ultrasonication technique for the extraction of lycopene from tomatoes. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.19, p.151-159, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.05.019>

ELBADRAWY, E.; SELLO, A. Evaluation of nutritional value and antioxidant activity of tomato peel extracts. **Arabian Journal of Chemistry**, v.9, p.1010-1018, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.11.011>

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.50, p.441-464, 2010. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>

ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.57, n.4, p.701-717, 2017. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493>

FALADE, K. O.; SOLADEMI, O. J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, p.278-288, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02133.x>

FERREIRA, J. P. L.; CASTRO, D. S.; MOREIRA, I. S.; SILVA, W. P.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Convective drying kinetics of osmotically pretreated papaya cubes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.3, p.200-208, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n3p200-208>

FORMIGA, A. S.; DA COSTA, F. B.; DA SILVA, M. S.; PEREIRA, E. M.; BRASIL, Y. L. Physical and chemical aspects of fruit Quipá (*Tacinga inamoena*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.11, p.25-29, 2016. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v11i5.4559>

FRANCIS, F. J. **Analysis of anthocyanins**. In: Markakis, P. (Ed). Anthocyanins as food colors. New York: Academic Press, p.181-207, 1982.

GALAZ, P.; VALDENEGRO, M.; RAMÍREZ, C.; NUÑEZ, H.; ALMONACID, S.; SIMPSON, R. Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. **Journal of Food Engineering**, v.208, p.19-27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.002>

GAO, Y.; GUO, X.; LIU, Y.; FANG, Z.; ZHANG, M.; ZHANG, R.; YOU, L.; LI, T.; LIU, R. H. A full utilization of rice husk to evaluate phytochemical bioactivities and prepare cellulose nanocrystals. **Scientific Reports**, v.8, Article number: 10482, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27635-3>

GARAU, M. C.; SIMAL, S.; FEMENIA, A.; ROSSELLO, C. Drying of orange skin: drying kinetics modeling and functional properties. **Journal of Food Engineering**, v.75, p.288-295, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.017>

GARCÍA-CAYUELA, T.; GÓMEZ-MAQUEO, A.; GUAJARDO-FLORES, D.; WELTI-CHANES, J.; CANO, M. P. Characterization and quantification of individual betalain and phenolic compounds in Mexican and Spanish prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill) tissues: A comparative study. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.76, p.1-13, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.11.002>

GARCÍA-PÉREZ, J. V.; ORTUÑO, C.; PUIG, A.; CARCEL, J. A.; PÉREZ-MUNUERA, I. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. **Food and Bioprocess Technology**, v.5, p.2256-2265, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0645-0>

GIL, L. S.; MAUPOEY, P. F. An integrated approach for pineapple waste valorisation. Bioethanol production and bromelain extraction from pineapple residues. **Journal of Cleaner Production**, v.172, p.1224-1231, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.284>

GOLDSMITH, C. D.; VUONG, Q. V.; STATHOPOULOS, C. E.; ROACH, P. D.; SCARLETT, C. J. Ultrasound increases the aqueous extraction of phenolic compounds with high antioxidant activity from olive pomace. **LWT - Food Science and Technology**, v.89, p.284-290, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.10.065>

GOMES, F. P.; RESENDE, O.; SOUSA, E. P.; OLIVEIRA, D. E. C.; ARAÚJO-NETO, F. R. Drying kinetics of crushed mass of ‘jambu’: Effective diffusivity and activation energy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, p.499-505, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p499-505>

GONZALEZ-AGUILAR, G.; ROBLES-SANCHEZ, R.; MARTINEZ-TELLEZ, M.; OLIVAS, G.; ALVAREZ-PARRILLA, E.; ROSA, L. Bioactive compounds in fruits: Health benefits and effect of storage conditions. **Stewart Postharvest Review**, v.4, p.1-10, 2008. <https://doi.org/10.2212 / spr.2008.3.8>

GRABEŽ, M.; ŠKRBIĆ, R.; STOJILJKOVIĆ, M. P.; RUDIĆ-GRUJIĆ, V.; PAUNOVIĆ, M.; ARSIĆ, A.; PETROVIĆ, S.; VUČIĆ, V.; MIRJANIĆ-AZARIĆ, B.; ŠAVIKIN, K.; MENKOVIĆ, N.; JANKOVIĆ, T.; VASILJEVIĆ, N. Beneficial effects of pomegranate peel extract on plasma lipid profile, fatty acids levels and blood pressure in patients with diabetes mellitus type-2: a randomized, double-blind, placebo-controlled study. **Journal of Functional Foods**, v.64 p.103692, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103692>

GUIMARÃES, R. M.; DE OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SILVA, J. S.; REZENDE, T. A. M.; EGEA, M. B. Thermodynamic properties and drying kinetics of ‘okara’. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.6, p.418-423, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423>

GUINÉ, R. P. F.; HENRRIQUES, F.; BARROCA, M. J. Mass transfer coefficients for the drying of pumpkin (*Cucurbita moschata*) and dried product quality. **Food and Bioprocess Technology**, v.5, n.1, p.176-183, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0275-y>

GULLÓN, B.; EIBES, G.; MOREIRA, M. T.; HERRERA, R.; LABIDI, J.; GULLÓN, P. Yerba mate waste: A sustainable resource of antioxidant compounds. **Industrial Crops and Products**, v.113, p.398-405, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.064>

GULLÓN, B.; GULLÓN, P.; EIBES, G.; CARA, C.; TORRES, A.; LÓPEZ-LINARES, J. C.; RUIZ, E.; CASTRO, E. Valorisation of olive agro-industrial by-products as a source of bioactive compounds. **Science of the Total Environment**, v.645, p.533-542, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.155>

GÜMÜŞAY, O. A.; BORAZAN, A. A.; ERCAL, N.; DEMIRKOL, O. Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. **Food Chemistry**, v.173, p.156-162, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.162>

GUPTA, S.; COX, S.; ABU-GHANNAM, N. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed. **LWT - Food Science and Technology**, v.44, p.1266-1272, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.022>

GURAK, P. D.; BONA, G. S. D.; TESSARO, I. C.; MARCZAK, L. D. F. Jaboticaba Pomace Powder Obtained as a Co-product of Juice Extraction: A Comparative Study of Powder Obtained from Peel and Whole Fruit. **Food Research International**, v.62, p.786-792, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.04.042>

GÜRBÜZ, N.; ULUIŞIK, S.; FRARY, A.; FRARY, A.; DOĞANLAR, S. Health benefits and bioactive compounds of eggplant. **Food Chemistry**, v.268, p.602-610, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.093>

GUSTAVSSON, J.; CEDERBERG, C.; SONESSON, U.; van OTTERDIJK, R.; MEYBECK, A. **Global food losses and food waste. Extend, causes and prevention**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/GFL_web.pdf

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, v.17, p.1167-1172, 1974. <https://doi.org/10.13031/2013.37052>

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.6, p.169-174, 1961.

HENRÍQUEZ, C.; CÓRDOVA, A.; ALMONACID, S.; SAAVEDRA, J. Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. **Journal of Food Engineering**, v.143, p.146-153, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.037>

HORUZ, E.; BOZKURT, H.; KARATAŞ, H.; MASKAN, M. Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. **Food Chemistry**, v.230, p.295-305, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.046>

HU, G.; YU, W. Effect of hemicellulose from rice bran on low fat meatballs chemical and functional properties. **Food Chemistry**, v.186, p.239-243, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.063>

HUNT, D. 2006. **The new cactus lexicon**. Text Volume. DH Books, Milborne Port. 373p.

KAIALY, W.; SHAFIEE, M. A. Recent advances in the engineering of nanosized active pharmaceutical ingredients: Promises and challenges. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.228, p.71-91, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.11.010>

IGUAL, M.; GARCÍA-MARTÍNEZ, E.; MARTÍN-ESPARZA, M. E.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Effect of processing on the drying kinetics and functional value of dried apricot. **Food Research International**, v.47, p.284-290, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.019>

IQBAL, S.; HALEEM, S.; AKHTAR, M.; ZIA-UL-HAQ, M.; AKBAR, J. Efficiency of pomegranate peel extracts in stabilization of sunflower oil under accelerated conditions. **Food Research International**, v.41, p.194-200, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.11.005>

JIMENEZ-AGUILAR, D. M., GRUSAK, M. A. Minerals, vitamin C, phenolics, flavonoids and antioxidant activity of Amaranthus leafy vegetables. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.58, p.33-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.01.005>

JORGE, A. J.; GARZA, T. H. D. L.; ALEJANDRO, Z. C.; RUTH, B. C.; NOÉ, A. C. The optimization of phenolic compounds extraction from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) skin in a reflux system using response surface methodology. **Asian Pacific**

Journal of Tropical Biomedicine, v.3, p.436-442, 2013. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(13\)60093-3](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(13)60093-3)

KADERIDES, K.; GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G. A process for turning pomegranate peels into a valuable food ingredient using ultrasound-assisted extraction and encapsulation. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.31, p.204-215, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.08.006>

KADERIDES, K.; MOURTZINOS, I.; GOULA, A. M. Stability of pomegranate peel polyphenols encapsulated in orange juice industry by-product and their incorporation in cookies. **Food Chemistry**, v.310, p.125849, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125849>

KARXAN, M.; HAMLIN, A. S.; SCOTT, C. J.; OBIED, H. K. Drying at high temperature for a short time maximizes the recovery of olive leaf biophenols. **Industrial Crops and Products**, v.78, p.29-38, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.031>

KANATT, S. R.; CHANDER, R.; SHARMA, A. Antioxidant and antimicrobial activity of pomegranate peel extract improves the shelf life of chicken products. **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, n.2, p. 216-222, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02124.x>

KAO, T. H.; CHEN, C. J.; CHEN, B. H. Carotenoid composition in *Rhinacanthus nasutus* (L.) Kurz as determined by HPLC-MS and affected by freeze-drying and hot-air-drying. **Analyst**, v.136, p.3194-3202, 2011. <https://doi.org/10.1039/C1AN15090A>

KARA, C.; DOYMAZ, I. Thin layer drying kinetics of by-products from pomegranate juice processing. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.39, p.480-487, 2015. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12253>

Karathanos, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v.39, p.337-344, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00132-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00132-0)

KATALINIĆ, V.; MOŽINA, S. S.; SKROZA, D.; GENERALIĆ, I.; ABRAMOVIĆ, H.; MILOŠ, M.; LJUBENKOV, I.; PISKERNIK, S.; PEZO, I.; TERPINC, P.; BOBAN, M. Polyphenolic profile, antioxidant properties and antimicrobial activity of grape skin extracts of 14 *Vitis vinifera* varieties grown in Dalmatia (Croatia). **Food Chemistry**, v.119, p.715-723, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.019>

KETNAWA, S.; CHAIWUT, P.; RAWDKUEN, S. Pineapple wastes: A potential source for bromelain extraction. **Food and Bioproducts Processing**, v.90, p.385-391, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.12.006>

KHARCHOUFI, S.; LICCIARDELLO, F.; SIRACUSA, L.; MURATORE, G.; HAMDI, H.; RESTUCCIA, C. Antimicrobial and antioxidant features of ‘Gabsi’ pomegranate peel extracts. **Industrial Crops and Products**, v.111, p.345-352, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.037>

KIM, H.; MOON, J. Y.; KIM, H.; LEE, D-S.; CHO, M.; CHOI, H-K.; KIM, Y. S.; MOSADDIK, A.; CHO, S, K. Antioxidant and antiproliferative activities of mango (*Mangifera indica* L.) flesh and peel. **Food Chemistry**, v.121, p.429-436, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.060>

KOUBAA, MOHAMED.; BARBA, F. J.; GRIMI, N.; MHEMDI, H.; KOUBAA, W.; BOUSSETTA, N.; VOROBIEV, E. Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.37, Part C, p.336-344, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.015>

KOUKOUCH, A.; IDLIMAM, A.; ASBIK, M.; SARH, B.; IZRAR, B.; BOSTYN, S.; BAH, A.; ANSARI, O.; ZEGAOU, O.; AMINE, A. Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. **Renewable Energy**, v. 101. p. 565-574, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.006>

KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER, I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. **Drying Technology**, v.32, p.757-773, 2014. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.873047>

KUMAR, N.; SARKAR, B. C.; SHARMA, H. K. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying. **Food Science and Technology International**, v.17, p.459-469, 2011. <https://doi.org/10.1177/1082013211398832>

LABSI, M.; KHELIFI, L.; MEZIOUG, D.; SOUFLI, I.; TOUIL-BOUKOFFA, C. Antihydatic and immunomodulatory effects of *Punica granatum* peel aqueous extract in a murine model of echinococcosis. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine**, v.9, p.211-220, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apjtm.2016.01.038>

LAVELLI, V.; HARSHA, P. S. C. S.; LAUREATI, M.; PAGLIARINI, E. Degradation kinetics of encapsulated grape skin phenolics and micronized grape skins in various water activity environments and criteria to develop wide-ranging and tailor-made food applications. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.39, p.156-164, 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.12.006>

LEITE-LEGATTI, A. V.; BATISTA, A. G.; DRAGANO, N. R. V.; MARQUES, A. C.; MALTA, L. G.; RICCIO, M. F.; EBERLIN, M. N.; MACHADO, A. R. T.; CARVALHO-SILVA, L. B.; RUIZ, A. L. T. G.; CARVALHO, J. E.; PASTORE, G. M.; JÚNIOR, M. R. M. Jaboticaba peel: Antioxidant compounds, antiproliferative and antimutagenic activities. **Food Research International**, v.49, p.596-603, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.044>

LENQUISTE, S. A.; MARINELI, R. S.; MORAES, E. A.; DIONÍSIO, A. P.; BRITO, E. S.; JUNIOR, M. R. M. Jaboticaba peel and jaboticaba peel aqueous extract shows in vitro and in vivo antioxidant properties in obesity model. **Food Research International**, v.77, Part 2, p. 162-170, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.023>

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.13, p.427-432, 1921. <https://doi.org/10.1021/ie50137a021>

LI, S.; SHAH, N. P. Effects of various heat treatments on phenolic profiles and antioxidant activities of *Pleurotus eryngii* Extracts. **Journal of Food Science**, v.78, p.1122-1129, 2013. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12189>

LI, Y.; GUO, C.; YANG, J.; WEI, J.; XU, J.; CHENG, S. Evaluation of antioxidant properties of pomegranate peel extract in comparison with pomegranate pulp extract. *Food Chemistry*, v.96, p.254-260, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.033>

LIMA, D. A. **Plantas das caatingas**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1989. 243 p.

LIMA, M. A.; CHARALAMPOPOULOS, D.; CHATZIFRAGKOU, A. Optimisation and modelling of supercritical CO₂ extraction process of carotenoids from carrot peels. **The Journal of Supercritical Fluids**, v.133, Part 1, p.94-102, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.09.028>

LIMA, R. K. B.; SARMENTO, J. D. A.; NETA, T. R.; MORAIS, P. L. D.; SILVA, G. G.; SARMENTO, D. H. A. Caracterização dos frutos do pelo (*Tacinga inamoena*) e do mandacaru (*Cereus jamacaru*), Capítulo 34, p.335-344. In: OLIVEIRA, A. M.; VASCONCELOS, C. B. L.; SILVA, J. F.; MORAIS, M. A.; DIAS, N. S.; CAMACHO, R. G. V.; ALENCAR, R. D.; PORTO, V. C. N. Coleção Agroecologia e Meio Ambiente no Semiárido: Produção Orgânica no Semiárido, v.3. Editora da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (EDUFERSA), 1349 p. 2016. ISBN: 978-85-5757-063-4

LIU, R. H. Whole grain phytochemicals and health. **Journal of Cereal Science**, v.46, p.207-219, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.010>

LOBO, F. A.; NASCIMENTO, M. A.; DOMINGUES, J. R.; FALCÃO, D. Q.; HERNANZ, D.; HEREDIA, F. J.; ARAUJO, K. G. L. Foam mat drying of Tommy Atkins mango: Effects of air temperature and concentrations of soy lecithin and carboxymethylcellulose on phenolic composition, mangiferin, and antioxidant capacity. **Food Chemistry**, v.221, p. 258-266, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.080>

LÓPEZ-VARGAS, J. H.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; PÉREZ-ÁLVAREZ, J. Á.; VIUDA-MARTOS, M. Quality characteristics of pork burger added with albedo-fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*) co-products. **Meat Science**, v.97, p.270-276, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.02.010>

LOURITH, N.; KANLAYAVATTANAKUL, M. Appraisal of Thai glutinous rice husk for health promotion products. **Journal of Cereal Science**, v.57, p.343-347, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.12.005>

LUCA, A.; CILEK, B.; HASIRCI, V.; SAHIN, S.; SUMNU, G. Storage and baking stability of encapsulated sour cherry phenolic compounds prepared from micro- and nano-suspensions. **Food and Bioprocess Technology**, v.7, p.204–211, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1048-1>

LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory**. Academic Press, New York, 1968.

MAIDIN, N. M.; MICHAEL, N.; ORUNA-CONCHA, M. J.; JAUREGI, P. Polyphenols extracted from red grape pomace by a surfactant based method show enhanced collagenase and elastase inhibitory activity. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v.93, p.916-1924, 2018. <https://doi.org/10.1002/jctb.5459>

MAIDIN, N. M.; ORUNA-CONCHA, M. J.; JAUREGI, P. Surfactant TWEEN20 provides stabilisation effect on anthocyanins extracted from red grape pomace. **Food Chemistry**, v.271, p.224-231, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.083>

MALDONADO, A. F S.; MUDGE, E.; GÄNZLE, M. G.; SCHIEBER, A. Extraction and fractionation of phenolic acids and glycoalkaloids from potato peels using acidified water/ethanol-based solvents. **Food Research International**, v.65, Part A, p.27-34, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.018>

MARTÍN-GARCÍA, B.; PIMENTEL-MORAL, S.; GÓMEZ-CARAVACA, A.M.; ARRÁEZ-ROMÁN, D.; SEGURA-CARRETERO, A. A Box-Behnken design for optimal green extraction of compounds from olive leaves that potentially activate the

AMPK pathway. **Applied Science**, v.10, n.13, 4620, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10134620>

MARTÍNEZ-PATIÑO, J. C.; GULLÓN, B.; ROMERO, I.; RUIZ, E.; BRNČIĆ, M.; ŽLABUR, J. S.; CASTRO, E. Optimization of ultrasound-assisted extraction of biomass from olive trees using response surface methodology. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.51, p.487-495, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.031>

MARTÍNEZ, R.; TORRES, P.; MENESES, M. A.; FIGUEROA, J. G.; PÉREZ-ÁLVAREZ, J. A.; VIUDA-MARTOS, M. Chemical, technological and in vitro antioxidant properties of mango, guava, pineapple and passion fruit dietary fibre concentrate. **Food Chemistry**, v.135, p.1520-1526, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.057>

MEDIANI, A.; ABAS, F.; TAN, C.; KHATIB, A. Effects of different drying methods and storage time on free radical scavenging activity and total phenolic content of *Cosmos caudatus*. **Antioxidants**, v.3, p.358-370, 2014. <https://doi.org/10.3390/antiox3020358>.

MENEZES, M. O. T.; TAYLOR, N. P.; MACHADO, M. C.; COELHO, P. J. A.; CORREIA, D. Diversity and distribution of Cactaceae in Ceará state, North-eastern Brazil. **Bradleya**, v.29, p.13-42, 2011. <https://doi.org/10.25223/brad.n29.2011.a3>

MENEZES, M. O. T.; TAYLOR, N. P.; LOIOLA, M. I. B. Flora do Ceará, Brasil: Cactaceae. **Rodriguésia**, v.64, p.757-774, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S2175-78602013000400007>

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, v.52, p.1644-1649, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.027>

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, p.1503-1513, 2002. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>

MOGHIMI, R.; GHADERI, L.; RAFATI, H.; ALIAHMADI, A.; MCCLEMENTS, D. J. Superior antibacterial activity of nanoemulsion of *Thymus daenensis* essential oil against *E. coli*. **Food Chemistry**, v.194, p.410-415, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.139>

MOURE, A.; CONDE, E.; FALQUÉ, E.; DOMÍNGUEZ, E.; PARAJÓ, J. C. Production of nutraceuticals from chestnut burs by hydrolytic treatment. **Food Research International**, v.65, Part C, p.359-366, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.08.052>

MOO-HUCHIN, V. C.; ESTRADA-MOTA, I.; ESTRADA-LEÓN, R.; CUEVAS-GLORY, L.; ORTIZ-VÁZQUEZ, E.; VARGAS Y VARGAS, M. L.; BETANCUR-ANCONA, D.; SAURI-DUCH, E. Determination of some physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of tropical fruits from Yucatan, Mexico. **Food Chemistry**, v.152, p.508-515, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.013>

MOUDACHE, M.; NERÍN, C.; COLON, M.; ZAIDI, F. Antioxidant effect of an innovative active plastic film containing olive leaves extract on fresh pork meat and its evaluation by Raman spectroscopy. **Food Chemistry**, v.229, p.98-103, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.023>

MPHAHLELE, R. R.; FAWOLE, O. A.; MAKUNGA, N. P.; OPARA, U. L. Effect of drying on the bioactive compounds. antioxidant. antibacterial and antityrosinase activities of pomegranate peel. **BMC Complement Alternative Medicine**, v.16, p.1-12, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1132-y>

MULITERNO, M. M.; RODRIGUES, D.; LIMA, F. S.; IDA, E. I.; KUROZAWA, L. E. Conversion/degradation of isoflavones and color alterations during the drying of okara. **LWT – Food Science and Technology**, v.75, p.512-519, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.031>

NAKAGAWA, K.; RITCHAROEN, W.; SRI-UAM, P.; PAVASANT, P.; ADACHI, S. Antioxidant properties of convective-air-dried *Spirulina maxima*: Evaluation of

phycocyanin retention by a simple mathematical model of air-drying. **Food and Bioproducts Processing**, v.100, Part A, p.292-302, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.014>

NAKTHONG, N.; WONGSAGONSUP, R.; AMORNSAKCHAI, T. Characteristics and potential utilizations of starch from pineapple stem waste. **Industrial Crops and Products**, v.105, p.74-82, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.048>

NASCIMENTO, V. T.; MOURA, N. P.; VASCONCELOS, M. A. S.; MACIEL, M. I. S.; ALBUQUERQUE, U. P. Chemical characterization of native wild plants of dry seasonal forests of the semi-arid region of northeastern Brazil. **Food Research International**, v.44, p.2112-2119, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.024>

NDAYISHIMIYE, J.; LIM, D. J.; CHUN, B. S. Antioxidant and antimicrobial activity of oils obtained from a mixture of citrus by-products using a modified supercritical carbon dioxide. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.57, p.339-348, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.08.041>

NIPORNRAM, S.; TOCHAMPA, W.; RATTANATRAIWONG, P.; SINGANUSONG, R. Optimization of low power ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from mandarin (*Citrus Reticulata Blanco* cv. Sainampueng) peel. **Food Chemistry**, v.241, p. 338-345, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.114>

NISCO, M.; MANFRA, M.; BOLOGNESE, A.; SOFO, A.; SCOPA, A.; TENORE, G.C.; PAGANO, F.; MILITE, C.; RUSSO, M.T. Nutraceutical properties and polyphenolic profile of berry skin and wine of *Vitis vinifera* L. (cv. Aglianico). **Food Chemistry**, v.140, p.623-629, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.123>

NUNES, M. A.; PIMENTEL, F. B.; COSTA, A. S. G.; ALVES, R. C.; OLIVEIRA, M. B. P. P. Olive by-products for functional and food applications: challenging opportunities to face environmental constraints. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.35, p.139-148, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.016>

ORSAVOVÁ, J.; HLAVÁČOVÁ, I.; MLČEK, J.; SNOPEK, L.; MIŠURCOVÁ, L. Contribution of phenolic compounds, ascorbic acid and vitamin E to antioxidant activity

of currant (*Ribes* L.) and gooseberry (*Ribes uvacrispa* L.) fruits. **Food Chemistry**, v.284, p.323-333, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.072>

ÖZDEMIRA, M. B.; AKTAŞA, M.; ŞEVIK, S.; KHANLARI, A. Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.42, n.28, p.18005-18013, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.012>

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers**. M.S. Thesis. Purdue University. West Lafayette, Indiana, 1949.

PEANPARKDEE, M.; PATRAWART, J.; IWAMOTO, S. Effect of extraction conditions on phenolic content, anthocyanin content and antioxidant activity of bran extracts from Thai rice cultivars. **Journal of Cereal Science**, v.86, p.86-91, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.011>

PEIXOTO, C. M.; DIAS, M. I.; ALVES, M. J.; CALHELHA, R. C.; BARROS, L.; PINHO, S. P.; FERREIRA, I. C. F. R. Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties. **Food Chemistry**, v.253, p.132-138, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.163>

PENG, N.; PRASAIN, J. K.; DAI, Y.; MOORE, R.; ARABSHAHI, A.; BARNES, S.; CARLSON, S.; WYSS, J. M. Chronic dietary kudzu isoflavones improve components of metabolic syndrome in stroke-prone spontaneously hypertensive rats. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.57, n.16, p.7268–7273, 2009. <https://doi.org/10.1021/jf901169y>

PEREIRA, E. M.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P.; SILVA, C. M. D. P. S. FORMIGA, A. S. COSTA, F. B. Empirical models in the description of prickly pear shoot (Nopal) drying kinetics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.798-802, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p798-802>

PERUSSELLO, C. A.; MARIANI, V. C.; AMARANTE, A. C. C. Numerical and experimental analysis of the heat and mass transfer during okara drying. **Applied**

Thermal Engineering, v.48, p.325-331, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.025>

PILATTI, D.; JOHANN, G.; PALÚ, F.; SILVA, E. A. Evaluation of a concentrated parameters mathematical model applied to drying of yerba mate leaves with variable mass transfer coefficient. **Applied Thermal Engineering**, v.105, p.483-489, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.139>

PLAZA, M.; BATISTA, A. G.; CAZARIN, C. B. B.; SANDAHL, M.; TURNER, C.; ÖSTMAN, E.; JÚNIOR, M. R. M. Characterization of antioxidant polyphenols from *Myrciaria jaboticaba* peel and their effects on glucose metabolism and antioxidant status: A pilot clinical study. **Food Chemistry**, v.211, p.185-197, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.142>

PRAWIRANTO, K.; DEFRAEYE, T.; DEROME, D.; BUHLMANN, A.; HARTMANN, S.; VERBOVEN, P.; NICOLAI, B.; CARMELIET, J. Impact of drying methods on the changes of fruit microstructure unveiled by X-ray micro-computed tomography. **RSC Advances**, v.9, p.10606-10624, 2019. <https://doi.org/10.1039/C9RA00648F>

RAHMAN, N. F. A.; SHAMSUDIN, R.; ISMAIL, A.; SHAH, N. N. A. K.; VARITH, J. Effects of drying methods on total phenolic contents and antioxidant capacity of the pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peels. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.50, p.217-225, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.009>

RAMOS, K. K.; LESSIO, B. C.; MECÊ, A. L. B.; EFRAIM, P. Mathematical modeling of uvaia byproduct drying and evaluation of quality parameters. **Food Science and Biotechnology**, v.26, p.643-651, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0078-2>

RESENDE, L. M.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) fruit by-products flours: Evaluation as source of dietary fibers and natural antioxidants. **Food Chemistry**, v.270, p.53-60, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.079>

RIBEIRO, S. M. R.; BARBOSA, L. C. A.; QUEIROZ, J. H.; KNÖDLER, M.; SCHIEBER, A. Phenolic compounds and antioxidant capacity of Brazilian mango

(*Mangifera indica* L.) varieties. **Food Chemistry**, v.110, p.620-626, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.067>

ROCKENBACH, I. I.; GONZAGA, L. V.; RIZELIO, V. M.; GONÇALVES, A. E. S. S.; GENOVESE, M. I.; FETT, R. Phenolic compounds and antioxidant activity of seed and skin extracts of red grape (*Vitis vinifera* and *Vitis labrusca*) pomace from Brazilian winemaking. **Food Research International**, v.44, p. 897-901, 2011a. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.049>

ROCKENBACH, I. I.; RODRIGUES, E.; GONZAGA, L. V.; CALIARI, V.; GENOVESE, M. I.; GONÇALVES, A. E. S. S.; FETTA, R. Phenolic compounds content and antioxidant activity in pomace from selected red grapes (*Vitis vinifera* L. and *Vitis labrusca* L.) widely produced in Brazil. **Food Chemistry**, v.127, p.174-179, 2011b. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.137>

RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, B.; FERREIRA-SANTOS, P.; GULLÓN, B.; TEIXEIRA, J.A.; BOTELHO, C.M.; YÁÑEZ, R. Exploiting the potential of bioactive molecules extracted by ultrasounds from avocado peels-Food and nutraceutical applications. **Antioxidants**, v.10, n.9, p.1475, 2021. <https://doi.org/10.3390/antiox10091475>

ROJAS, L. F.; CORTÉS, C. F.; ZAPATA, P.; JIMÉNEZ, C. Extraction and identification of endopeptidases in convection dried papaya and pineapple residues: A methodological approach for application to higher scale. **Waste Management**, v.78, p.58-68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.020>

ROMDHANE, N. G.; BONAZZI, C.; KECHAOU, N.; MIHOUBI, N. B. Effect of air-drying temperature on kinetics of quality attributes of lemon (*Citrus limon* cv. lunari) peels. **Drying Technology**, v.33, p.1581-1589, 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1012266>

SAFDAR, M. N.; KAUSAR, T.; JABBAR, S.; MUMTAZ, A.; AHAD, K.; SADDZOAI, A. A. Extraction and quantification of polyphenols from kinnow (*Citrus reticulata* L.) peel using ultrasound and maceration techniques. **Journal of Food and Drug Analysis**, v.25, p.488-500, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.07.010>

SÁNCHEZ-ZAPATA, E.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; PEÑARANDA, M.; FUENTES-ZARAGOZA, E.; SENDRA, E.; SAYAS, E.; PÉREZ-ALVAREZ, J. A. Technological properties of date paste obtained from date by-products and its effect on the quality of a cooked meat product. **Food Research International**, v.44, p.2401-2407, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.04.034>

SÁNCHEZ-ZAPATA, E.; MUÑOZ, C. M.; FUENTES, E.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; SENDRA, E.; SAYAS, E.; NAVARRO, C.; PÉREZ-ALVAREZ, J. A. Effect of tiger nut fibre on quality characteristics of pork Burger. **Meat Science**, v.85, p.70-76, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.12.006>

SANTOS D, C.; LEITE, D. D. F.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P. L.; SANTOS, F. S.; LIMA, T. L. B.; FIGUEIREDO, R. M. F.; COSTA, T. N. Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.22, p.1-12, 2019. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03118>

SANTOS, F. S.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; SANTOS, D. C. Drying kinetics and physical and chemical characterization of white-fleshed ‘pitaya’ peels. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.872-877, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p872-877>

SANTOS, L. C.; BITENCOURT, R. G.; SANTOS, P.; ROSA, P. T. V.; MARTÍNEZ, J. Solubility of passion fruit (*Passiflora edulis* sims) seed oil in supercritical CO₂. **Fluid Phase Equilibria**, v.493, p.174-180, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.04.002>

ŠAPONJAC, V. T.; ĆETKOVIĆ, G.; ČANADANOVIĆ-BRUNET, J.; PAJIN, B.; DJILAS, S.; PETROVIĆ, J.; LONČAREVIĆ, I.; STAJČIĆ, S.; VULIĆ, J. Sour cherry pomace extract encapsulated in whey and soy proteins: Incorporation in cookies. **Food Chemistry**, v,207, p.27-33m 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.082>

SELANI, M. M.; SHIRADO, G. A. N.; MARGIOTTA, G. B.; SALDAÑA, E.; SPADA, F. P.; PIEDADE, S. M.S.; CONTRERAS-CASTILLO, C. J.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G. Effect of pineapple byproduct and canola oil as fat replacers on physicochemical

and sensory quality of low-fat beef burger. **Meat Science**, v. 115, p.9-15, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.01.002>

SEPTEMBRE-MALATERRE, A.; STANISLAS, G.; DOURAGUIA, E.; GONTHIER, M. P. Evaluation of nutritional and antioxidant properties of the tropical fruits banana, litchi, mango, papaya, passion fruit and pineapple cultivated in Réunion French Island. **Food Chemistry**, v.212, p.225-233, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.147>

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, v.23. p.1261-1271, 1980.
<https://doi.org/10.13031/2013.34757>

SILVA, L. M. R.; FIGUEIREDO, E. A. T.; RICARDO, N. M. P. S.; VIEIRA, I. G. P.; FIGUEIREDO, R. W.; BRASIL, I. M.; GOMES, C. L. Quantification of bioactive compounds in pulps and by-products of tropical fruits from Brazil. **Food Chemistry**, v.143, p.398-404, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.001>

SILVA, L. O.; RANQUINE, L. G.; MONTEIRO, M.; TORRES, A. G. Pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil enriched with conjugated linolenic acid (cLnA), phenolic compounds and tocopherols: improved extraction of a specialty oil by supercritical CO₂. **The Journal of Supercritical Fluids**, v.147, p.126-137, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.02.019>

SILVA S, M.; BRITO-PRIMO, D. M.; TORRES, L. B. V.; MARTINS, L. P.; LIMA, A. B.; SILVA, F. V. G. Features of postharvest physiology and quality of cactaceae fruits from Brazilian Northeast. **Acta Horticulturae (ISHS)**, v.811, p.113-122, 2009.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.811.11>

SILVA, W. P.; AMARAL, D. S.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C.; SILVA, C. M. D. P. S.; PINHEIRO, R. M. M.; PESSOA, T. Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (*Cocos nucifera* L.) pieces: a three-dimensional approach. **Journal of Food Engineering**, v.115, n.1, p.121-131, 2013a.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.007>

SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. O.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions. **Heat and Mass Transfer**, v.48, n.5, p.809-821, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0931-4>

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v.98, n.3, p.302-308, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.029>

SILVA W, P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S. Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, v.95, p.298-304, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.05.008>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A.; GOMES, J. Palmeira. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.13, p.67-74, 2014a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2013.01.003>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P. Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. **Journal of Food Engineering**, v.117, p.417–424, 2013b, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.03.030>

SILVA W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; LINS, M. A. A.; COSTA, W. S. Optimal removal of experimental points to determine apparent thermal diffusivity of canned products. **International Journal of Food Engineering**, v.10, n.2, p.223-231, 2014b. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2013-0016>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, L. D.; FARIAS, V. S. O. Drying of clay slabs during the falling rate period: optimization and simulation of the process using diffusion models. **Journal of Materials Science Research**, v.2, n.2, p.1-13, 2013c. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v2n2p1>

SINGH, S. P.; JAIRAJ, K. S.; SRIKANT, K. Universal drying rate constant of seedless grapes: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, p.6295-6302, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.011>

SINGH, J. P.; KAUR, A.; SHEVKANI, K.; SINGH, N. Influence of jambolan (*Syzygium cumini*) and xanthan gum incorporation on the physicochemical, antioxidant and sensory properties of gluten-free eggless rice muffins. **International Journal of Food Science and Technology**, v.50, p.1190-1197, 2015. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12764>

SIVAKUMAR, R.; SARAVANAN, R.; PERUMAL, A. E.; INIYAN, S. Fluidized bed drying of some agro products - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.61, p.280-301, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.014>

SLEDZ, M.; WIKTOR, A.; RYBAK, K.; NOWACKA, M.; WITROWA-RAJCHERT, D. The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. **Applied Acoustics**, v.103, Part B, p.148-156, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.05.006>

SOARES, P. A. G.; VAZ, A. F. M.; CORREIA, M. T. S.; PESSOA-JUNIOR, A.; CUNHA, M. G. C. Purification of bromelain from pineapple wastes by ethanol precipitation. **Separation and Purification Technology**, v.98, p.389-395, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.06.042>

SOONG, Y. Y.; BARLOW, P. J. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds. **Food Chemistry**, v.88, p.411-417, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.02.003>

SOUZA, A. C. M.; GAMARRA-ROJA, G.; ANDRADE, S. A. C.; GUERRA, N. B. Características físicas, químicas e organolépticas de quipá (*Tacinga inamoena*, cactaceae). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.29, p.292-95, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452007000200020>

SQUILLACI, G.; APONE, F.; SENA, L. M.; CAROLA, A.; TITO, A.; BIMONTE, B.; DE LUCIA, A.; COLUCCI, G.; LA CARA, F.; MORANA, A. Chestnut (*Castanea sativa*

Mill.) industrial wastes as a valued bioresource for the production of active ingredients.

Process Biochemistry, v.64, p.228-236, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.09.017>

STATSOFT. **Statistica for Window - Computer programa manual**. (2007). Versão 7.0 Tulsa: Statsoft Inc.

STEVANATO, N.; SILVA, C. Radish seed oil: ultrasound-assisted extraction using ethanol as solvent and assessment of its potential for ester production. **Industrial Crops and Products**, v.132, p.283-291, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.032>

SUN, J.; HU, X.; ZHAO, G.; WU, J.; WANG, Z.; CHEN, F.; LIAO, X. Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Food Science and Technology International**, v.13, n.2, p.91-97, 2007. <https://doi.org/10.1177/1082013207078525>

SUSALIT, E.; AGUS, N.; EFFENDI, I.; TJANDRAWINATA, R. R.; NOFIARNY, D.; PERRINJAQUET-MOCCHETTI, T.; VERBRUGGEN, M. Olive (*Olea europaea*) leaf extract effective in patients with stage-1 hypertension: comparison with Captopril. **Phytotherapy**, v.18, n.4, p.251-258, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2010.08.016>

TAO, Y.; WANG, P.; WANG, Y.; KADAM, S. U.; HAN, Y.; WANG, J.; ZHOU, J. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: impact on drying kinetics and selected quality properties. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.31, p.310-318, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.012>

TAYLOR, J. R. **An Introduction to Error Analysis**, 2nd ed. Sausalito, California, University Science Books, 1997.

TAYLOR, N. P.; ZAPPI, D. 2004. **Cacti of Eastern Brazil**. Royal Botanic Gardens, Kew. 499 p.

TELLO-IRELAN, C.; LEMUS-MONDACA, R.; Vega-Gálvez, A.; López, J.; Di Scala, K. Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. **LWT - Food Science and Technology**, v.44, p.2112-2118, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.06.008>

THOMPSON, T. L.; PEART, P. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. **Transactions of the ASAE**, v.11. p.582-586, 1968.

TOPUZ, O. K.; YERLIKAYA, P.; UCAK, I.; GUMUS, B.; BÜYÜKBENLİ, H. A. Effects of olive oil and olive oil–pomegranate juice sauces on chemical, oxidative and sensorial quality of marinated anchovy. **Food Chemistry**, v.154, p.63-70, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.103>

TORKI-HARCHEGANI, M.; GHANBARIAN, D.; PIRBALOUTI, A. G.; SADEGHI, M. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.58, p.407-418, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.078>

TOURNOUR, H. H.; SEGUNDO, M. A.; MAGALHÃES, L. M.; BARREIROS, L.; QUEIROZ, J.; CUNHA, L. M. Valorization of grape pomace: extraction of bioactive phenolics with antioxidant properties. **Industrial Crops and Products**, v.74, p.397-406, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.055>

TRABELSI, D.; AYDI, A.; ZIBETTI, A. W.; PORTA, G. D.; SCOGNAMIGLIO, M.; CRICCHIO, V.; LANGA, E.; ABDERRABBA, M.; MAINAR, A. M. Supercritical extraction from *Citrus aurantium amara* peels using CO₂ with ethanol as co-solvent. **The Journal of Supercritical Fluids**, v.117, p.33-39, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.07.003>

TZEMPELIKOS, D. A.; MITRAKOS, D.; VOUIROS, A. P.; BARDAKAS, A. V.; FILIOS, A. E.; MARGARIS, D. P. Numerical modelling of heat and mass transfer during

convective drying of cylindrical quince slices. **Journal of Food Engineering**, v.156, p.10-21, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017>

VEGA-GÁLVEZ, A.; MIRANDA, M.; DÍAZ, L. P.; LOPEZ, L.; RODRIGUEZ, K.; DI SCALA, K. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. **Bioresource Technology**, v.101, p.7265-7270, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.040>

VEGA-GÁLVEZ, A.; ZURA-BRAVO, L.; LEMUS-MONDACA, R.; MARTINEZ-MONZÓ, J.; QUISPE-FUENTES, I.; PUENTE, L.; DI SCALA, K. Influence of drying temperature on dietary fibre. rehydration properties. texture and microstructure of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). **Journal of Food Science and Technology**, v.52, p.2304-2311, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1235-0>

VIJAYARAJ, B.; SARAVANAN, R.; RENGANARAYANAN, S. Studies on thin layer drying of bagasse. **International Journal of Energy Research**, v.31, p.422-437, 2007. <https://doi.org/10.1002/er.1237>

VIUDA-MARTOS, M.; RUIZ-NAVAJAS, Y.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; SENDRA, E.; SAYAS-BARBERÁ, E.; PÉREZ-ÁLVAREZ, J. A. Antioxidant properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) bagasses obtained as co-product in the juice extraction. **Food Research International**, v.44, p.1217-1223, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.057>

WANG, W.; BOSTIC, T. R.; GU, L. Antioxidant capacities, procyanidins and pigments in avocados of different strains and cultivars. **Food Chemistry**, v.122, p.1193-1198, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.114>

WANG, Z.; SUN, J.; CHEN, F.; LIAO, X.; HU, X. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. **Journal of Food Engineering**, v.80, p.536-544, 2007a. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.019>

WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. **Food Research International**, v.40, p.39-46, 2007b. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.07.017>

WATERHOUSE, A. Oxidation of wine phenolics: a critical evaluation and hypotheses. **American Journal of Enology and Viticulture**, v.57, p.356-357, 2006. Disponível em: < <http://waterhouse.ucdavis.edu/faqs/folin-ciocalteau-micro-method-for-total-phenol-in-wine> >. Acessado em: Setembro de 2019.

WEI, L.; SHAOYUN, W.; SHUTAO, L.; JIANWU, Z.; LIJING, K.; PINGFAN, R. Increase in the free radical scavenging capability of bitter gourd by a heat-drying process. **Food & Function**, v.4, p.1850-1855, 2013. <https://doi.org/10.1039/C3FO60169B>

WILKINS, R.; BRUSEY, J.; GAURA, E. Modelling uncontrolled solar drying of mango waste. **Journal of Food Engineering**, v.237, p.44-51, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.012>

WOJDYŁO, A.; FIGIEL, A.; LECH, K.; NOWICKA, P.; OSZMIANŚKI, J. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. **Food and Bioprocess Technology**, v.7, p.829-841, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1130-8>

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATAY, F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON AGRICULTURAL MECHANIZATION AND ENERGY, 7, 1999. Adana. **Proceedings...** Adana: Faculty of Agriculture. Cukurova University, p.565-569, 1999.

YAMASHITA, C.; CHUNG, M. M. S.; SANTOS, C.; MAYER, C. R. M.; MORAES, I. C. F.; BRANCO, I. G. Microencapsulation of an anthocyanin-rich blackberry (*Rubus* spp.) by-product extract by freeze-drying. **LWT - Food Science and Technology**, v.84, p.256-262, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.063>

ZEFANG, L.; ZHAO, Z.; HONGMEI, W.; ZHIQIN, Z.; JIE, Y. Phenolic composition and antioxidant capacities of chinese local Pummelo cultivars peel. **Horticultural Plant Journal**, v.2, p.133-140, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2016.05.001>

ZHANG, Q.; MEJIA, E. G.; LUNA-VITAL, D.; TAO, T.; CHANDRASEKARAN, S.; CHATHAM, L.; JUVIK, J.; SINGH, V.; KUMAR, D. Relationship of phenolic composition of selected purple maize (*Zea mays* L.) genotypes with their anti-inflammatory, anti-adipogenic and anti-diabetic potential. **Food Chemistry**, v.289, p.739-750, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.116>

ZHANG, H.; YANG, Y.; ZHOU, Z. Phenolic and flavonoid contents of mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruit tissues and their antioxidant capacity as evaluated by DPPH and ABTS methods. **Journal of Integrative Agriculture**, v.17, p.256-263, 2018. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61664-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61664-2)

ZHANG, Z.; WANG, X.; LI, L.; WEI, Q.; LIU, C.; NIE, M.; LI, D.; XIAO, Y.; LIU, C.; XU, L.; ZHANG, M.; JIANG, N. Evaluation of the impact of food matrix change on the in vitro bioaccessibility of carotenoids in pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices during two drying processes. **Food & Function**, v.8, p.4693-4702, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7FO01382E>

ZHAO, P.; ZHONG, L.; ZHU, R.; ZHAO, Y.; LUO, Z.; YANG, X. Drying characteristics and kinetics of Shengli lignite using different drying methods. **Energy Conversion and Management**, v.120, p.330-337, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.105>

ZHU, F.; DU, B.; ZHENG, L.; LI, J. Advance on the bioactivity and potential applications of dietary fibre from grape pomace. **Food Chemistry**, v.186, p.207-212, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.057>

ZHU, M.; HUANG, Y.; WANG, Y.; SHI, T.; ZHANG, L.; CHEN, Y.; XIE, M. Comparison of (Poly) phenolic compounds and antioxidant properties of pomace extracts from kiwi and grape juice. **Food Chemistry**, v.271, p.425-432, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.151>

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos com a realização desta pesquisa proporcionaram a elaboração de dois artigos científicos e um pedido de patente discriminados a seguir:

Artigo I – “Utilization of cumbeba (*Tacinga inamoena*) residue: drying kinetics and effect of process conditions on antioxidant bioactive compounds”, publicado no periódico **Foods** (2021, 10, 788) JCR 2020 = 4,35 (Anexo A);

Artigo II – “Description of cumbeba (*Tacinga inamoena*) waste drying at different temperatures using diffusion models”, publicado no periódico **Foods** (2021, 10, 788) JCR 2020 = 4,35 (Anexo B);

Depósito de Patente de invenção intitulada “Resíduo de cumbeba em pó obtido pelo processo de secagem convectiva” (Número do Processo: BR 10 2021 008090 6) (Anexo C).

ARTIGO I

Aproveitamento do resíduo de cumbeba (*Tacinga inamoena*): cinética de secagem e efeito das condições do processo nos compostos bioativos antioxidantes

Resumo: O resíduo gerado no processamento da polpa da fruta de *Tacinga inamoena* (cumbeba) representa uma grande quantidade de material que é descartado sem a devida aplicação. Apesar disso, trata-se de uma matéria-prima fonte de ácido ascórbico, carotenoides e compostos fenólicos, valorizados em dietas nutracêuticas por alegado combate a radicais livres gerados no metabolismo. Este trabalho de pesquisa apresenta um estudo focado na modelagem matemática da cinética de secagem e o efeito do processo no nível de bioativos do resíduo de cumbeba. Os experimentos de secagem do resíduo de cumbeba (resíduo não tratado/integral (WR), resíduo triturado (CR) e resíduo na forma de espuma (FR)) foram realizados em secador de leito fixo em quatro temperaturas do ar (50, 60, 70 e 80 °C). A difusividade efetiva de água (D_{ef}) foi determinada pelo método inverso e sua dependência da temperatura foi descrita por uma equação do tipo Arrhenius. Observou-se que, independentemente do tipo de pré-tratamento, o aumento da temperatura do ar resultou em maior taxa de retirada de água. O modelo de Midilli forneceu simulação superior da cinética de secagem do resíduo de cumbeba do que os demais modelos testados na faixa de temperatura experimental estudada. A difusividade efetiva de água (D_{ef}) variou de $6,4890-11,1900 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $2,9285-12,754 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,5393 \times 10^{-8}-12,4270 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ com energia de ativação de 22,3078, 46,7115 e 58,0736 kJ/mol dentro da faixa de temperatura de 50–80 °C obtidos para o resíduo de cumbeba integral, triturado e na forma de espuma, respectivamente. Em relação aos compostos bioativos, observou-se que para uma temperatura fixa o resíduo na forma integral apresentou maior retenção de compostos bioativos, principalmente de fenólicos, enquanto o resíduo triturado e o resíduo na forma de espuma apresentaram níveis intermediários e inferiores, respectivamente. Este estudo fornece evidências de que o resíduo de cumbeba em sua forma integral pode ser utilizado para a recuperação de compostos bioativos antioxidantes naturais, principalmente compostos fenólicos, com possibilidade de aplicação nas indústrias alimentícia e farmacêutica.

Palavras-chave: subproduto; pré-tratamentos; secagem convectiva; difusividade efetiva de água; compostos fenólicos

1. Introdução

A cumbebeira (*Tacinga inamoena*) é uma planta da família das cactáceas nativa e típica do Nordeste do Brasil, produz frutos denominado de cumbeba, do tamanho de uma ameixa, com casca amarelo-alaranjada e polpa carnosa amarela que envolve as sementes. O fruto tem sido relatado como fonte de compostos bioativos, como compostos fenólicos, carotenoides, betalainas e vitamina C [1-7], substâncias que foram sugeridas como tendo potenciais efeitos benéficos sobre a saúde humana [8-11]. Além disso, devido à natureza exótica, o crescente reconhecimento de seu valor nutricional e terapêutico e suas características sensoriais inéditas no mercado, tem demonstrado grande potencial como matéria-prima para a agroindústria [1,2,4].

O processamento da cumbeba resulta em altos percentuais de resíduos (64,70-79,01% do fruto processado) [1,2,6] contendo compostos antioxidantes cujos benefícios à saúde têm sido reiterados, e o seu descarte, além de acarretar desperdício de valor agregado, provoca impacto ambiental e impõe custos extras de transporte e descarga em aterros sanitários. Portanto, o aproveitamento do resíduo de cumbeba, para dar origem a um produto com alto valor agregado, a exemplo do que tem sido feito com outros subprodutos agroindustriais, como por exemplo, para a extração de compostos bioativos antioxidantes [12-14], corantes naturais [15-17], entre tantos outros materiais [18-21], pode levar a ganhos econômicos, prevenir ou diminuir problemas ambientais causados pelo descarte direto do resíduo no meio ambiente e contribuir para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva da cumbeba mais rentável e sustentável.

No entanto, para que isso aconteça, é necessário que um processamento intermediário crie uma forma estável do resíduo de cumbeba para facilitar o seu gerenciamento posterior, como valorização ou armazenamento, pois quando em sua forma original úmida (82,60 a 89,67% b.u.) [1,3], exige uso praticamente instantâneo ou para garantir a sua preservação deve ser congelado até que seja utilizado, além disso, torna o seu transporte dispendioso, o que geram custos operacionais adicionais. Por outro lado, produtos secos oferecem a vantagem de serem mais estáveis por um período maior de tempo [22,23], ocupam menor volume, oferecendo, assim, redução de custos com embalagem, armazenamento e transporte [24,25]. A secagem também tem sido frequentemente empregada antes da extração de compostos bioativos antioxidantes de subprodutos agroindustriais [26-28] e de outras biomassas vegetais [29-31], visando não somente promover a sua preservação até que seja

utilizado, mas também impede a interferência da água no processo de extração, o que melhora a eficiência e o rendimento de extração dos compostos alvo [32-34].

A secagem convectiva pode ser um excelente pré-tratamento, mesmo melhor do que a liofilização, antes de se obter extratos ricos em compostos bioativos e com alta capacidade antioxidante [35]. O conteúdo de compostos fenólicos e a atividade antioxidante de extratos de folhas de oliveira foram significativamente aumentados em consequência da secagem convectiva das folhas em altas temperaturas (3 h, 105 °C) [36]. Wei et al. [37] verificaram que a capacidade total de eliminação de radicais livres do extrato de abóbora amarga aumentou significativamente com o aumento da temperatura de secagem convectiva (40-60 °C) da abóbora, enquanto o conteúdo de compostos fenólicos e flavonoides não foram afetados. Este comportamento pode ser devido ao fato de que mudanças na estrutura celular (paredes celulares, vacúolos, etc.), rompimento de ligações com moléculas da matriz vegetal (carboidratos e proteínas) e/ou inativação de enzimas endógenas (hidrolíticas e oxidativas), como resultado do processo de secagem [38-40], facilitam a extração dos compostos bioativos associados [41,42].

A secagem convectiva com ar quente de biomassas vegetais pode ser simulada com modelos matemáticos, uma ferramenta potencialmente útil para otimizar o processo, porque ajuda a entender os mecanismos que afetam o transporte de água, seja interno ou externo, durante a secagem. Esses modelos são divididos em três categorias: teóricos, empíricos e semi-empíricos [43-45]. Enquanto os modelos teóricos ou difusivos consideram não apenas as condições externas (na forma de condições de contorno), mas também o mecanismo de resistência à transferência de água dentro do produto, baseado, principalmente, na segunda Lei de Fick, modelos empíricos e semi-empíricos consideram, em condições isotérmicas, apenas a resistência externa à transferência de água entre o produto e o ar de secagem [46-48]. Embora diferentes parâmetros estatísticos possam ser utilizados para avaliar o desempenho dos modelos matemáticos de secagem [49], em geral, o modelo que melhor descreve a curva de secagem do produto é aquele que apresenta os valores mais altos do coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e/ou eficiência de modelagem e os valores mais baixos de qui-quadrado, erro quadrático médio, erro médio percentual relativo, erro médio de polarização, erro padrão, erro absoluto médio, soma residual de quadrados, resíduos e/ou desvio padrão [43, 46, 47]. Numerosos estudos investigaram a cinética de secagem de diferentes subprodutos agroindustriais para determinar o coeficiente de difusividade de água e o modelo matemático, difusivo e/ou empírico, que melhor representa o seu processo de secagem [50-56]. Contudo, para o resíduo de cumbeba, com exceção de

Ferreira et al. [57], não há estudos, pelo menos até onde sabemos, sobre seu comportamento de secagem em diferentes temperaturas e tratamentos.

Durante a secagem convectiva, diferenças nos compostos bioativos do produto seco, em comparação com o fresco, são observadas [58-60]. Contudo, em geral, a extensão e o efeito, positivo ou negativo, dessas alterações dependem de fatores como temperatura e/ou tempo de secagem [59,61], tipo de material ou composto químico específico [62-65] e pré-tratamento aplicado [66-68]. Azeza et al. [69] observaram que o conteúdo fenólico e atividade antioxidante de fatias de tomate aumentaram com o aumento da temperatura de secagem (50-70 °C), mas diminuíram em função do tempo. Romdhane et al. [70] verificaram que, seja qual for a temperatura (40-60 °C), a secagem convectiva de cascas de limão resultou em uma redução significativa dos teores de fenólicos totais e flavonoides, em comparação com o material fresco. Mphahlele et al. [64], no entanto, não observaram diferenças significativas nos compostos fenólicos totais e flavonoides em casca de romã secas em diferentes temperaturas (40-60 °C). Başlar et al. [71] descobriram que os níveis de compostos bioativos (fenólicos totais, antocianinas e flavonoides) e a atividade antioxidante foram maiores em arilos de romã secos na temperatura mais alta (75 °C). Cruz et al. [53], também mediram um aumento do potencial bioativo para a casca de uva como consequência da secagem convectiva na temperatura de 70 °C.

A secagem convectiva de materiais biológicos promove desvios na quantidade, associado à sensibilidade do composto ao aquecimento, e diferentes transformações químicas nos compostos bioativos podendo, em certos casos, ocorrer tanto à degradação quanto a síntese de novos compostos com atividade antioxidante [72,73], o que pode levar a dificuldades na interpretação dos resultados. Portanto, entender como as condições de secagem influenciam a qualidade final do produto seco, em comparação com o fresco, torna-se indispensável para uma melhor compreensão do processo de secagem e futura aplicação do resíduo de cumbeba, como por exemplo, para a extração de compostos com princípios ativos. Nesse contexto, este estudo foi realizado para investigar como a temperatura e o tipo de pré-tratamento (integral, triturado ou espuma) influenciam as características de secagem do resíduo de cumbeba, para determinar o tempo de secagem, selecionar o melhor modelo matemático para as curvas de secagem, calcular a taxa de secagem, difusividade efetiva e energia de ativação. Finalmente, a fim de avaliar o uso potencial do resíduo de cumbeba para a extração de compostos bioativos para formulações de alimentos funcionais, os efeitos das diferentes condições de secagem (temperaturas e tratamentos) sob os níveis de compostos

bioativos selecionados (fenólicos totais, flavonoides, antocianinas e betalaínas) foram investigados.

2. Material e métodos

2.1. Material

Amostras de cumbebas foram colhidas de exemplares de *Tacinga inamoena* vegetando em clima semiárido, no entorno das coordenadas 7° 45' 3" S 37° 38' 20" W. Foram escolhidos frutos em estágio maduro, identificado pela cor da casca amarela com tons alaranjados, sendo estes transportados ao ambiente de laboratório em recipientes de polietileno expandido. Na recepção, foram lavados em água corrente, escovados para remoção dos pelos lignificados presentes na casca, e sanitizados em solução de cloro diluído em água na proporção de 100 mg/kg durante 20 min, seguindo-se de enxágue em água potável. Os frutos foram despulpados em despulpadeira rotativa de batelada (Laboremus, Brasil), construída em aço inoxidável e provida de tela para separação da polpa do resíduo, constituído de sementes e cascas com vestígios de polpa. O resíduo foi homogeneizado, acondicionado em bolsas de polietileno de baixa densidade e armazenado em câmara fria a -18 °C (HVF-301S; Hesstar, Brasil), de onde foi retirado paulatinamente para a realização dos ensaios experimentais. O resíduo apresentou um teor de água inicial médio de 4.001 g de água/g de matéria seca (79.913%, b.u.), determinado gravimetricamente por secagem em estufa a 70 °C e pressão \leq 100 mmHg até peso constante, de acordo com o método padrão 934.01 da Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [74]. Foram utilizados como agentes espumantes o emulsificante Emustab e o estabilizante Liga Neutra, ambos produtos comerciais da marca Du Porto[®]. Reagente Folin-Ciocalteu, ácido gálico e o carbonato de sódio foram adquiridos da Sigma Aldrich (St. Louis, Missouri, EUA). Todos os produtos químicos eram de grau analítico.

2.2. Secagem convectiva

Para utilização nos ensaios, as amostras eram descongeladas em duas etapas, primeiramente a 4 °C durante 24 h e em seguida a aproximadamente 25 °C por 2 h. Após esse tempo, dividiu-se o material em três subamostras, sendo a primeira constituída por resíduo integral (RI), a segunda, resíduo triturado (RT), e a terceira, resíduo convertido em

espuma (RE). O resíduo não tratado/integral foi seco sem qualquer pré-tratamento. O pré-tratamento de trituração foi realizado de acordo com estudo anterior [57]. Enquanto que para a formação da espuma, a fim de facilitar a incorporação e homogeneização do agente espumante e estabilizante, o resíduo foi triturado juntamente com água destilada na proporção de 2:1 (resíduo: água, m/m) usando processador de alimentos (Philco, PMP1600P, 1400W, Brasil) na velocidade máxima por 5 min, obtendo-se uma pasta com fragmentos de casca e sementes, a qual se incorporou o emulsificante (Emustab, Du Porto[®] - 2,5 g/100 g de pasta) e o estabilizante (Liga Neutra, Du Porto[®] - 1,5 g/100 g de pasta) e, então, procedeu-se a agitação em um misturador (Arno, Modelo SX15, 250 W, Brasil) na velocidade máxima (nível de velocidade de rotação: 3) por 15 min para a formação da espuma. Em testes preliminares (dados não mostrados) a espuma foi considerada estável para o processo de secagem em camada de espuma.

As amostras integral, triturada e em espuma foram espalhadas em bandejas com formato circular, medindo $84,45\text{cm} \pm 0,61$ mm de diâmetro, em camadas com espessura uniforme de $9,56 \pm 0,44$ mm, e submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar (Fanem, modelo 320, Brasil) nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, com fluxo de ar paralelo às bandejas, em velocidade de 1,5 m/s. Antes da inserção das amostras na câmara de secagem, para garantir que a condição de estado estacionário fosse alcançada, a temperatura do secador foi ajustada e mantida por 60 min. O comportamento das secagens foi determinado fazendo-se a pesagem das amostras antes e durante o processo, registrando-se as reduções de massa em balança com precisão de 0,01 g (Marte, modelo AS5500C, Brasil), em intervalos de tempo regulares, em torno de 1,0 min. Os experimentos de secagem foram realizados até que as amostras atingissem massa constante, isto é, quando não houve variação na massa por três medidas consecutivas, que foi assumido como estado de equilíbrio. Uma vez que os autores acreditam que a heterogeneidade do resíduo pode influenciar os resultados obtidos, para obter a reprodutibilidade nas descobertas experimentais, todos os experimentos de secagem foram realizados em seis repetições. O resíduo seco era retirado da bandeja e triturado em processador de alimentos (Black Decker, modelo HC31X-Tipo 2, 120 W, China), em intervalos de alguns segundos para evitar o estresse térmico do material, resultando em um pó de tamanho de partículas de 0,074-0,84 mm (peneirado em malha de nº 20-200) que foi embalado em embalagem laminada e armazenado a -18 °C para análise posterior.

No presente estudo, os dados da massa do resíduo de cumbeba, em diferentes intervalos de tempo, para as diferentes condições de secagem (temperatura e pré-tratamento)

foram convertidos em dados de teor de água (b.s.). Então, o teor de água adimensional (RX) foi calculado a partir dos valores do teor água inicial, teor de água em diferentes intervalos de tempo e do teor de água de equilíbrio, de acordo com a Equação (1):

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

onde X_t , X_0 e X_e são teor de água em um tempo t (g de água/100 g de matéria seca), teor de água inicial (g de água/100 g de matéria seca) e teor de água de equilíbrio (g de água/100 g de matéria seca), respectivamente.

A taxa de secagem para cada experimento pode ser obtida através da Equação (2) [75,76]:

$$\text{Taxa de secagem} = \frac{X_t - X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (2)$$

onde $X_{t+\Delta t}$, X_t e Δt são o teor de água em $t + \Delta t$ (g água/g matéria seca), o teor de água em t (g água/g matéria seca) e a diferença entre o tempo atual (t) e o tempo anterior (t_0) de secagem (min), respectivamente. O comportamento de secagem foi determinado usando um gráfico da taxa de secagem versus t para todos os experimentos.

2.3. Modelagem matemática da cinética de secagem

Para modelar a cinética de secagem do resíduo de cumbeba, nas diferentes condições de secagem, dez modelos de secagem em camada fina foram escolhidos e estão detalhados na Tabela 1. Os modelos foram ajustados aos dados experimentais usando-se o *software* Statistica[®] versão 7.0, através de regressão não linear, pelo método Quase-Newton (Statsoft[®] Inc, Tulsa, EUA, 2007).

Tabela 1. Modelos utilizados para ajustar as curvas de cinética de secagem do resíduo de cumbeba

n° do modelo	Nome do modelo	Equação do modelo	Referência
1	Newton	$RX = \exp(-kt)$	[77]
2	Page	$XR = \exp(-kt^n)$	[78]
3	Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-kt)$	[79]
4	Exponencial de Dois Termos	$RX = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	[80]
5	Thompson	$RX = \exp(-a(a^2+4bt)^{0,5})/2b$	[81]
6	Logarítmico	$XR = a \exp(-kt) + c$	[82]
7	Aproximação da Difusão	$RX = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	[80]
8	Henderson e Pabis Modificado	$RX = a \exp(-kt) + b \exp(-kt) + c \exp(-kt)$	[83]
9	Dois Termos	$RX = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	[84]
10	Midilli	$RX = a \exp(-kt^n) + bt$	[85]

RX - Teor de água adimensional, adimensional; a, b, c, k, k₀, k₁, n - Coeficientes dos modelos; t - Tempo de secagem (min).

A qualidade de ajuste de cada modelo aos dados experimentais foi verificada usando o coeficiente de determinação (R^2) (Equação (3)), o desvio quadrático médio (DQM) (Equação (4)) e o qui-quadrado (χ^2) (Equação (5)) [46,47]. O modelo com o maior valor de R^2 e os menores valores de DQM e χ^2 foi selecionado como o melhor modelo para descrever a cinética de secagem do resíduo de cumbeba.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(RX_{\text{exp},i} - \overline{RX}_{\text{exp},i}) - (RX_{\text{pred},i} - \overline{RX}_{\text{pred},i})]^2}{\sum_{i=1}^N (RX_{\text{exp},i} - \overline{RX}_{\text{exp},i})^2 + \sum_{i=1}^N (RX_{\text{pred},i} - \overline{RX}_{\text{pred},i})^2} \quad (3)$$

$$DQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RX_{pred,i} - \overline{RX}_{pred,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^N (RX_{exp,i} - \overline{RX}_{exp,i})^2 \quad (5)$$

onde $RX_{exp,i}$, $\overline{RX}_{exp,i}$, $RX_{pred,i}$, $\overline{RX}_{pred,i}$, N e n são o teor de água adimensional experimental, média do teor de água adimensional experimental, teor de água adimensional predito pelo modelo, média do teor de água adimensional predito pelo modelo, número de observações e número de coeficientes (constantes) do modelo, respectivamente.

2.4. Determinação da difusividade efetiva de água

A solução analítica da segunda Lei de Fick foi utilizada para descrever a secagem do resíduo de cumbeba (integral, triturado e na forma de espuma) considerando a forma geométrica das amostras como aproximada de uma placa infinita (área \gg espessura). Esse modelo assume: (1) coeficiente convectivo de transferência de massa (h) e difusividade efetiva de água (D_{ef}) constantes; (2) material homogêneo e isotrópico; (3) distribuição de água inicial uniforme; (4) o único mecanismo de transporte de água é a difusão; (5) variação insignificante do volume da amostra. Para uma condição de contorno do terceiro tipo, $RX(t)$ é dado pela Equação (6) [86,87]:

$$RX(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} D_{ef} t\right) \quad (6)$$

Na Equação 6, o parâmetro B_n é dado pela Equação (7):

$$B_n = \frac{2Bi^2}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} \quad (7)$$

onde Bi é o número Biot de transferência de massa:

$$Bi = \frac{hL/2}{D_{\text{eff}}} \quad (8)$$

onde h é o coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s); L é a espessura da placa infinita (m) e D_{ef} é a difusividade efetiva de água. Nas Equações (6) e (7), μ_n são as raízes da seguinte equação transcendental:

$$\cot \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi} \quad (9)$$

As raízes da Equação (9) foram calculadas para diferentes valores de número de Biot de transferência de massa (Bi) ($0 \leq Bi \leq 200$), sendo a difusividade efetiva de água (D_{ef}) e o coeficiente convectivo de transferência de massa (h) determinados minimizando a função objetivo qui-quadrado [88,89], de acordo com algoritmo de otimização proposto por Silva et al. [90], usando 16 termos da série dada na Equação (6) empregando o *software* Convective Adsorption - Dessorption (Universidade Federal de Campina Grande, Brasil).

2.5. Determinação da energia de ativação

No presente estudo, uma equação do tipo Arrhenius, Equação (10), foi usada para relacionar a difusividade efetiva de água (D_{ef}) e a temperatura do ar de secagem (T) [25,91,92]:

$$D_{\text{ef}} = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right] \quad (10)$$

onde D_0 é o fator pré-exponencial (m^2/s), E_a é a energia de ativação (kJ/mol), R é a constante universal dos gases (0,008314 kJ/mol K) e T é a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$).

2.6. Análises químicas

2.6.1. Compostos fenólicos totais

O conteúdo de compostos fenólicos totais (CFT) foi determinado de acordo com o método micro Folin-Ciocalteu adaptado por Waterhouse [93], que utiliza o reagente Folin-Ciocalteu, carbonato de sódio, metanol e ácido gálico para obtenção da curva padrão. Primeiro, pesou-se 1,0 g da amostra e adicionou-se aos poucos 50 mL de água destilada, macerando-se até completa homogeneização. A mistura foi, então, deixada em repouso, em temperatura ambiente (25 ± 2 °C), durante 30 min, em sala escura; logo após, foi filtrada e adicionou-se o reagente de Folin-Ciocalteu fenol (125 µL) seguido de agitação vigorosa e repouso por 5 minutos. Após o tempo de reação, 250 µL de solução aquosa de carbonato de sódio (Na_2CO_3) (20 g/100 g de solução) foi adicionado, seguido de nova agitação e repouso em banho-maria a 40 °C, por 30 minutos. Um branco de reagente foi preparado usando água destilada, reagente de Folin-Ciocalteu fenol e solução de carbonato de sódio. A absorbância do extrato foi medida a 765 nm utilizando um espectrofotômetro UV/Visível (Coleman, modelo 35-D, Brasil). O resultado foi expresso em mg de equivalente de ácido gálico (EAG)/100 g de matéria seca, calculado através da Equação (11). A curva padrão foi obtida variando-se a concentração da solução de ácido gálico entre 0 e 22,5 µg/mL ($R^2 = 0,9994$). A análise foi realizada em quadruplicata.

$$\text{CFT} = \frac{(A-B) \times V_e}{10 \times a \times m \times V_d} \quad (11)$$

onde A é a absorbância medida, a é o coeficiente angular da equação da curva padrão, b é o coeficiente linear da equação da curva padrão, m é a massa da amostra seca (g), V_e é o volume do extrato (mL) e V_d é o volume da diluição (mL).

2.6.2. Flavonóides e antocianinas

Os conteúdos de flavonóides totais (FT) e antocianinas totais (AT) foram determinados segundo a metodologia descrita por Francis [94], onde pesou-se 1,0 g da amostra, adicionou-se 10 mL da solução de etanol-HCl (1,5 N) na proporção 85:15 (v:v), macerou-se por 1 min, recolheu-se o extrato em um tubo de ensaio, guardando-o sob refrigeração (5 °C) por 24 h.

Após este período, filtrou-se o extrato em algodão e fez-se a leitura em espectrofotômetro UV/Visível (Coleman, modelo 35-D, Brasil) a 374 nm para flavonoides e 535 nm para antocianinas. Os resultados foram expressos em mg/100 g de matéria seca, calculados utilizando as Equações (12) e (13). A análise foi realizada em quadruplicata.

$$FT = \frac{A \times F_d}{76,6} \quad (12)$$

$$AT = \frac{A \times F_d}{98,2} \quad (13)$$

onde A é a absorbância medida e F_d é o fator de diluição do extrato, calculado conforme a Equação (14).

$$F_d = \frac{100 \times V}{m} \quad (14)$$

onde m é a massa da amostra seca (g) e V o volume da diluição (mL).

2.6.3. Betalaínas

As betalaínas (betaxantinas e betacianinas) foram determinadas de acordo com Castellar et al. [95] com algumas adaptações. Os extratos foram preparados utilizando solução de etanol:água na proporção 80:20 (v:v) como solvente de extração. Aproximadamente 1,0 g de amostra foi macerada em 10 mL de etanol a 80%, então, foi agitada e, em seguida, armazenada sob refrigeração (5 °C) por 24 h. Após este período, a mistura foi centrifugada a 4 °C e 3.500 rpm durante 10 min. Em seguida, recolheu-se o sobrenadante em uma proveta e a parte insolúvel foi reextraída com mais 10 mL de etanol a 80%, que foi submetido ao mesmo procedimento descrito anteriormente. Os dois sobrenadantes foram combinados e o volume final ajustado para 25 mL com etanol a 80%; por fim, o extrato foi novamente submetido à agitação. As absorbâncias dos extratos foram medidas em espectrofotômetro UV/Visível (Coleman, modelo 35-D, Brasil) a 480 nm para betaxantinas e 535 nm para betacianinas. Os resultados foram expressos em mg/100 g de matéria seca, calculados de acordo com a Equação (15). A análise foi realizada em quadruplicata.

$$\text{Betx. ou Betac.} = \frac{A \times F_d \times PM \times V \times 100}{\epsilon \times L \times m} \quad (15)$$

onde A é a absorvância medida a 480 nm (betaxantinas) ou 535 nm (betacianinas), F_d é o fator de diluição do extrato, PM é o peso molecular (308 g/mol e 550 g/mol para betaxantinas e betacianinas, respectivamente), V é o volume do extrato, ϵ é o coeficiente de extinção (48.000 L/mol cm e 60.000 L/mol cm para betaxantinas e betacianinas, respectivamente), L é a largura da curva do espectrofotômetro (1 cm) e m é a massa seca da amostra (g).

2.7. Análise estatística

Os resultados foram expressos como a média \pm desvio padrão e análise de dados foi realizada utilizando o *software* Statistica[®] versão 7.0 (Statsoft[®] Inc, Tulsa, EUA, 2007). As diferenças entre as médias dos tratamentos foram determinadas usando análise de variância unidirecional (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Tukey em um intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

3. Resultados e discussão

3.1. Cinética de secagem

No início do processo ($t = 0$ e $RX = 1$), a quantidade de água do RI, RT e RE foi de $4,001 \pm 0,341$ g de água/g de matéria seca ($79,913 \pm 1,377\%$, b.u.), $4,032 \pm 0,263$ g de água/g de matéria seca ($80,079 \pm 1,039\%$, b.u.) e $5,248 \pm 0,341$ g de água/g de matéria seca ($83,948 \pm 0,884\%$, b.u.), respectivamente.

3.1.1. Influência da temperatura do ar

As curvas experimentais da cinética de secagem do RI, RT e RE, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, que descrevem a evolução do teor de água adimensional em relação ao tempo, são mostradas nas Figuras 1a a 1c. Observa-se que o teor de água adimensional (RX) diminuiu continuamente com o tempo, ressaltando, ainda, que com o aumento da temperatura de secagem, independente do pré-tratamento que o resíduo foi submetido, menores são os tempos necessários para que as amostras atinjam o teor de água de equilíbrio.

Para o RI (Figura 1a) os tempos de secagem correspondem a 1320, 900, 840 e 600 min, com teor de água final ($RX = 0$) de 6,060, 5,994, 10,836 e 9,148% (b.s.), nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Para o RT (Figura 1b), nas quatro temperaturas, os tempos de secagem foram de 1560, 1320, 1080 e 780 min, com teor de água final de 6,601, 5,297, 10,431 e 10,095% (b.s.), enquanto para o RE (Figura 1c) os tempos de secagem foram de 1380, 840, 480 e 420 min, com teor de água final de 7,578, 6,307, 11,044 e 9,197% (b.s.), nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Constatase que com o aumento da temperatura de secagem de 50 para 80 °C houve uma redução de 54,54% (720 min), 50,0% (780 min) e 69,56% (960 min) no tempo de secagem do RI, RT e RE, respectivamente. O aumento da temperatura promove maior taxa de transferência de calor [96], provocando maior grau de agitação das moléculas de água [97] e, portanto, uma maior pressão de vapor na amostra [98], o que se traduz em elevação de sua mobilidade [99,100], isso pode acelerar a remoção de água e, dessa forma, reduzir o tempo de secagem. Resultados similares foram relatados na literatura [101-103].

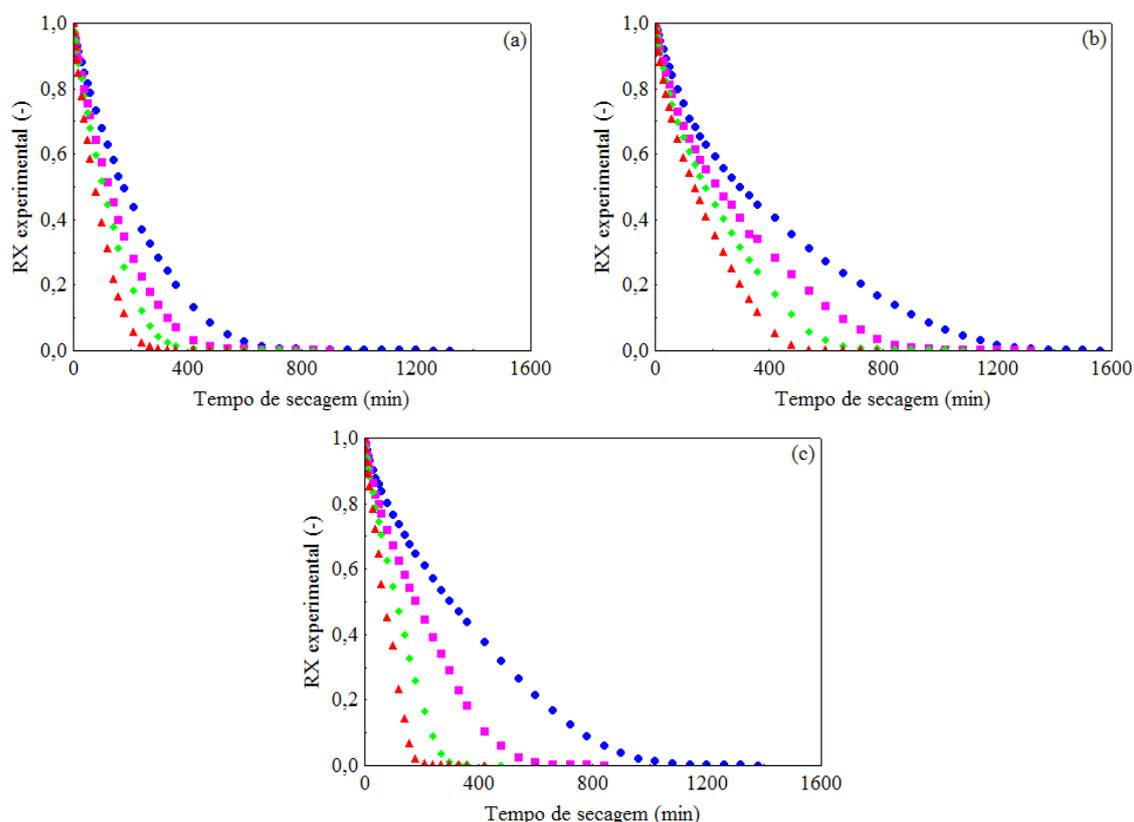


Figura 1. Teor de água adimensional vs. tempo de secagem em diferentes temperaturas do ar para o (a) RI, (b) RT e (c) RE: (●) 50 °C, (■) 60 °C, (◆) 70 °C e (▲) 80 °C

Nas Figuras 2a a 2c são mostrados a variação da taxa de secagem com o tempo, nas diferentes condições de secagem, onde, em todos os tipos de pré-tratamentos, podemos observar que o aumento na temperatura resultou em maior taxa de secagem. O aumento da temperatura favorece a transferência de calor que resulta em aquecimento mais rápido e maior vibração das moléculas de água e, portanto, uma maior pressão de vapor na amostra [96-98]. Isso pode acelerar a remoção de água. Além disso, verifica-se que o processo de secagem do RI, RT e RE ocorre em praticamente três estágios. Durante o estágio inicial, primeiro período de secagem, comum a todas as condições de secagem estudadas, nota-se que, devido ao rápido aumento da temperatura das amostras (aquecimento inicial) [104-107], houve maior taxa de secagem no início do processo, onde, destaca-se um curto período de aceleração, em que os valores da taxa de secagem aumentam rapidamente para o valor máximo.

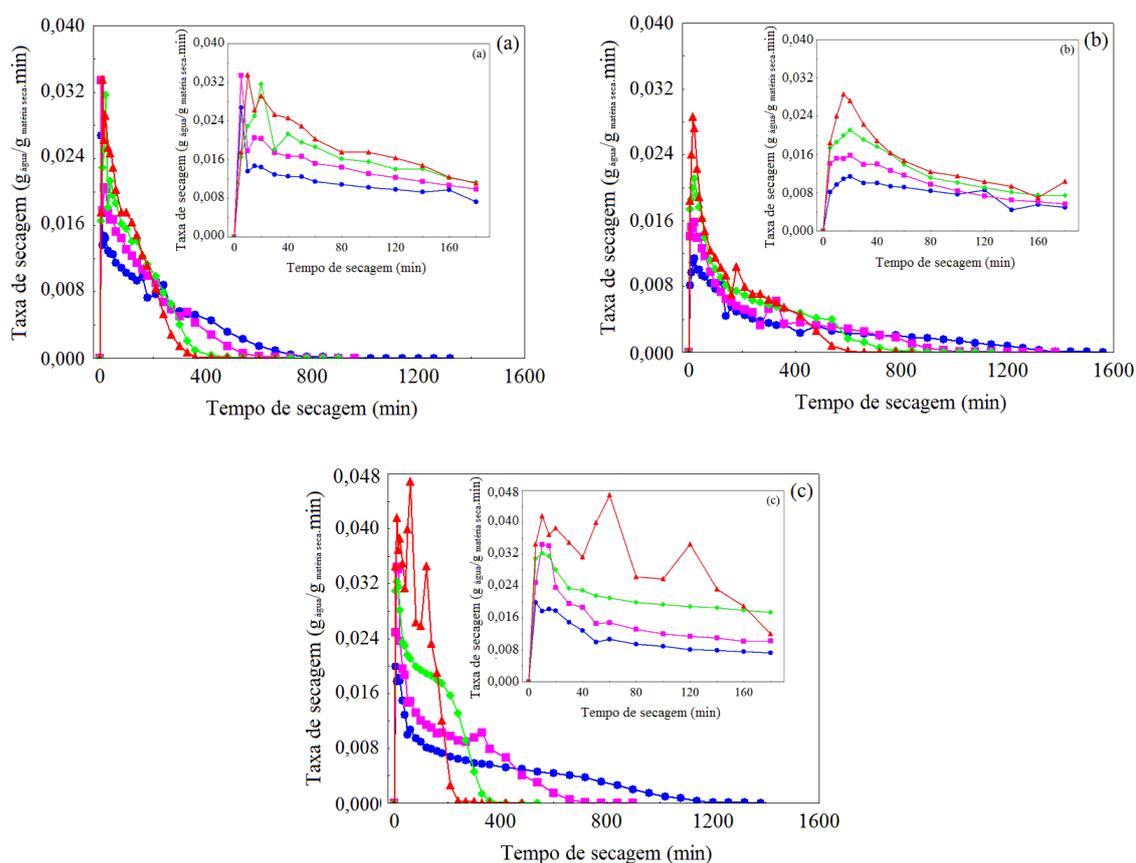


Figura 2. Variação da taxa de secagem com o tempo em diferentes temperaturas do ar para o (a) RI, (b) RT e (c) RE: (●) 50 ° C, (■) 60 ° C, (◆) 70 ° C, (▲) e 80 ° C

No segundo estágio, segundo período de secagem, imediatamente após o pico (valor máximo da taxa de secagem), que aparece mais claramente, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, no resíduo na forma de espuma (Figura 2c), a taxa de secagem sofre uma diminuição acentuada e, em seguida, mantém pouca variação (estabilidade), revelando que a evaporação da água na interface produto-ar ocorre a uma taxa semelhante à difusão de água a partir do interior do produto à sua superfície. A estrutura porosa das amostras, sobretudo de RE, pode, possivelmente, facilitar a transferência interna de umidade, de modo a manter a superfície saturada por um longo tempo. À medida que a secagem avança, no estágio final de secagem (terceiro período ou período de taxa decrescente), como a superfície das amostras tornaram-se insaturadas de umidade e a frente de secagem foi deslocada para o seu interior, a difusão térmica é cada vez mais dificultada, pois o gradiente de temperatura entre a superfície e as camadas internas das amostras é progressivamente reduzido [104, 107, 108], em contra partida, a água, que encontra-se principalmente nas camadas internas [109-111], precisa percorrer um caminho cada vez maior até a superfície [112], onde, será removida pelo fluxo de ar de secagem, por isso, a taxa de secagem decresceu continuamente com o tempo até que se estabeleceu o equilíbrio entre as amostras e o ar de secagem (taxa de secagem = 0, $t = t_{\infty}$). Comportamento semelhante foi observado por Cuevas [56] durante a secagem em diferentes temperaturas (69,85-119,85 °C) de biomassas da olivicultura.

É importante ressaltar que o RE, na temperatura de 80 °C (Figura 2c), apresentou apenas o período de aceleração, aqui denominado de primeiro período de secagem, seguido de um período bem maior de taxa decrescente com o tempo (período de taxa decrescente), não havendo período durante o qual a taxa de secagem é constante ou tende a uma estabilidade. O comportamento de secagem do RE acima mencionado pode ser explicado, possivelmente, porque na temperatura de 80 °C as camadas externas são rapidamente secas e a evaporação estava ocorrendo principalmente nas regiões internas, que não consegue fornecer um suprimento estável de água à superfície da espuma, característica do segundo período de secagem. Esse fenômeno é resultado do recuo da frente de secagem em direção ao centro da amostra (meio poroso), caracterizado pela perda de conectividade entre a superfície exposta e a água no interior do material [113], nesta fase, a resistência interna ao transporte molecular de água (difusão), que ocorre como resultado de um gradiente de concentração de água no interior do produto [33], torna-se muito maior do que a resistência externa à remoção do vapor de água na superfície das amostras pelo ar de secagem [114-116]. Resultados semelhantes foram encontrados na secagem de espuma de polpa de abóbora

[117], espuma de suco de yacon (*Smallanthus sonchifolius*) [118] e espuma de polpa de tomate [119].

3.1.2. Influência do tipo de pré-tratamento

Em relação à influência do tipo de pré-tratamento (RI, RT e RE) no comportamento de RX com o tempo de secagem apresentado nas Figuras 3a a 3d, note-se que, nas temperaturas de 50 e 60 °C (Figuras 3a e 3b, respectivamente), não houve diferença marcante, durante o período inicial, entre as curvas de secagem do resíduo na forma de espuma e o triturado, e que o RI levou menos tempo (1320 min), na temperatura de 50 °C, para alcançar o equilíbrio (RX = 0) que o RT (1560 min) e o RE (1380 min).

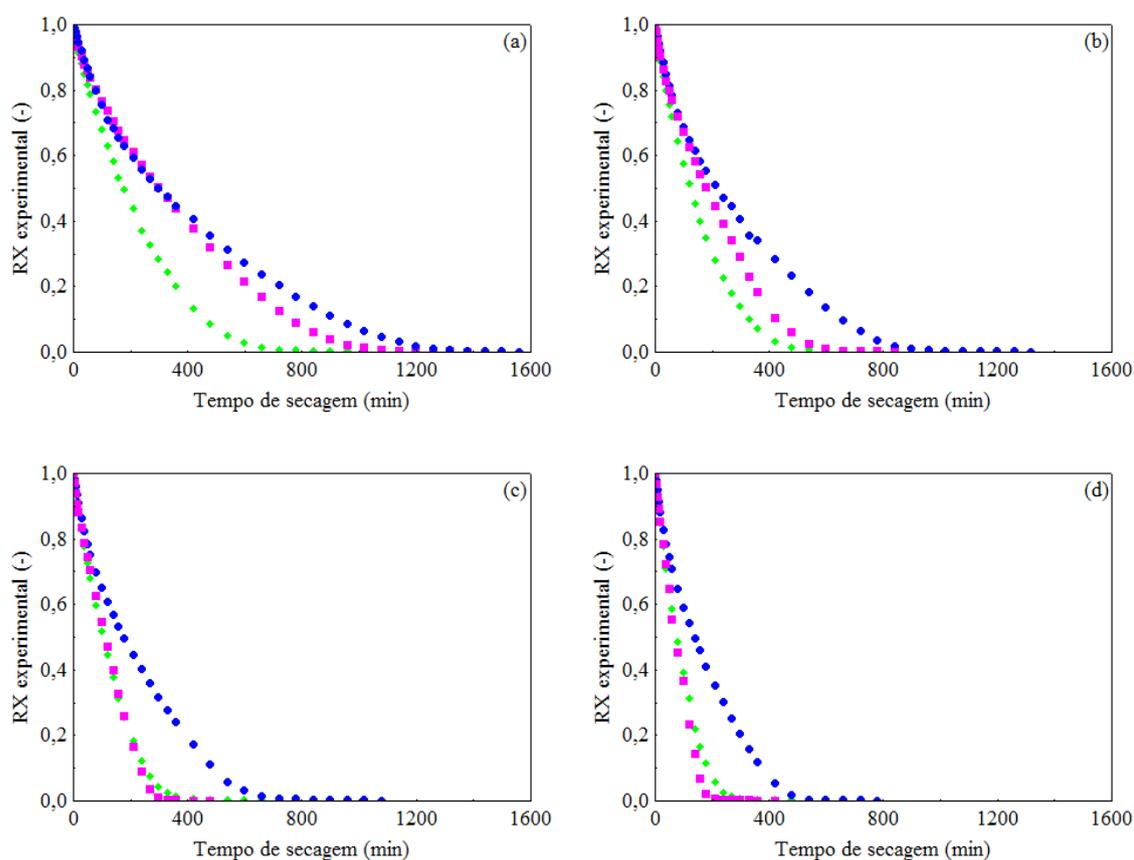


Figura 3. Teor de água adimensional vs. tempo de secagem em diferentes formas de pré-tratamentos para as temperaturas do ar de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C: (♦) resíduo integral, (●) resíduo triturado e (■) resíduo pré-tratado como espuma

Por outro lado, para as temperaturas de secagem de 60, 70 e 80 °C (Figuras 3b, 3c e 3d, respectivamente), embora as curvas de secagem do RE e do RI não se desviem muito

uma da outra, sobretudo em 70 e 80 °C, o RE apresentou os menores tempos de secagem (840, 480 e 420 min, respectivamente), seguido do RI (900, 840 e 600 min, respectivamente) e do RT (1320, 1080 e 780 min, respectivamente). Isso se deve ao fato de que a estrutura interna, mais porosa e uniforme, e a grande área de superfície exposta do RE facilitam às transferências de calor e massa com o ar de secagem [112,120,121], o que eventualmente melhora a perda de água (taxa) no final do processo, em comparação com o RI e RT, principalmente em temperaturas elevadas, levando a um processo de secagem mais rápido.

As taxas de secagem do resíduo de cumbeba submetido a diferentes pré-tratamentos para uma temperatura específica são mostradas nas Figuras 4a a 4d.

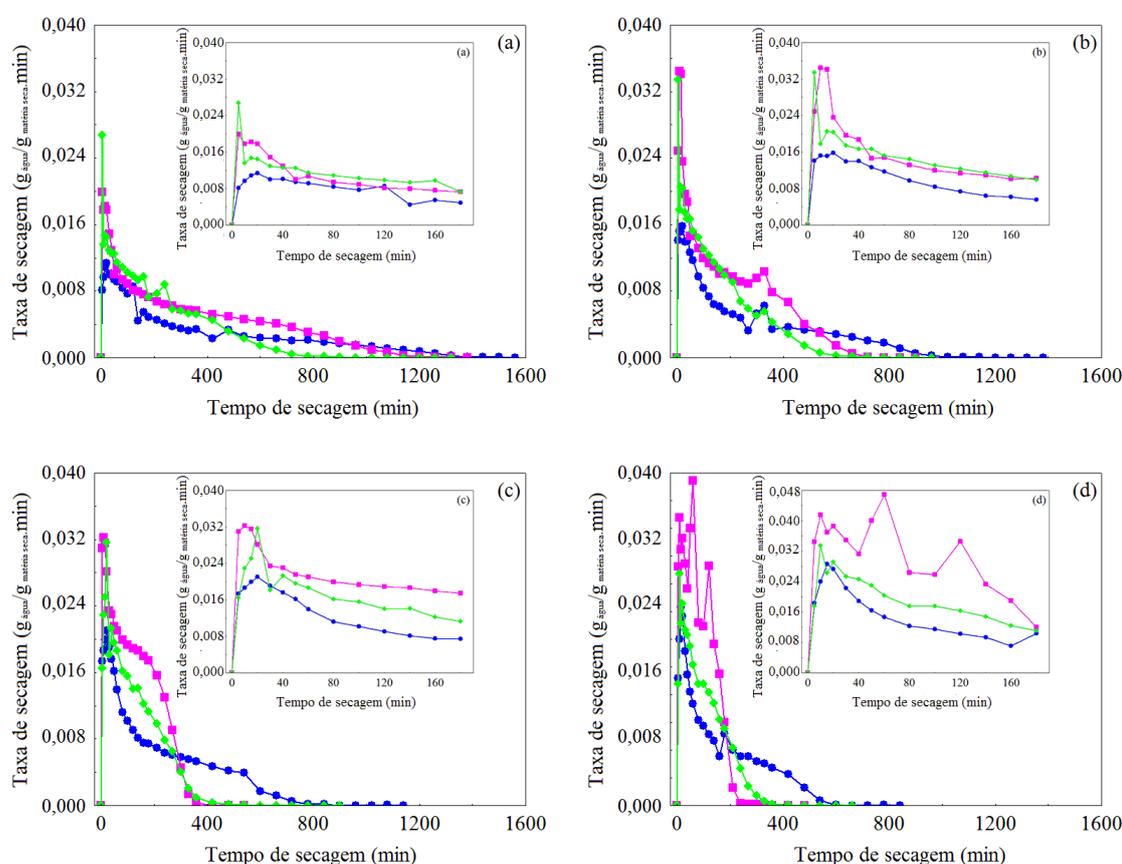


Figura 4. Teor de água adimensional vs. tempo de secagem em diferentes pré-tratamentos para as temperaturas do ar de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C: (◆) resíduo integral, (●) resíduo triturado (■) resíduo na forma de espuma

Embora o RI nas temperaturas de 50 e 60 °C (Figuras 4a e 4b, respectivamente), principalmente na maior parte do segundo período de secagem ($40 \text{ min} < t \leq 180 \text{ min}$), exibisse uma taxa de secagem ligeiramente mais alta (valores máximos alcançados de 0,027 e 0,033 g água/g matéria seca.min, respectivamente), o RE apresentou maiores valores durante,

praticamente, o restante do período de secagem (período de taxa decrescente). Enquanto, nas temperaturas de 70 e 80 °C (Figuras 4c e 4d, respectivamente), RE apresentou, de forma geral, os maiores valores de taxa de secagem (valores máximos alcançados de 0,032 e 0,042 g água/g matéria seca.min, respectivamente), seguido do RI (0,032 e 0,033 g água/g matéria seca.min, respectivamente) e RT (0,021 e 0,029 g água/ g matéria seca.min, respectivamente).

O comportamento de secagem (ver Figuras 4a a 4d) do resíduo submetido aos diferentes pré-tratamentos testados pode ser explicado pelas características estruturais de cada tipo amostra. O RI apresentava estrutura, em comparação com o RT e RE, embora mais heterogênea também mais porosa, que permitiu o contato entre o ar de secagem e as camadas internas das amostras, resultando em melhores transferências de calor e massa, especialmente nas menores temperaturas (50-60 °C). Contudo, observou-se que em temperaturas elevadas (70-80 °C) houve a formação de uma crosta seca e pouco permeável nos fragmentos de cascas ligados a polpa residual, que levou a uma maior resistência as transferências de calor e massa e, portanto, dificultou a remoção de água. Além disso, a presença de sementes pode, em razão da natureza compactada e fibrosa, ter sido mais um obstáculo para uma remoção mais eficiente de água. Esses efeitos parecem ter uma influência relativa menor sobre o transporte de água a baixas temperaturas, o que pode, também, explicar a variação que ocorreu no teor de água final do produto (ver na seção 3.1.1).

Por sua vez, o RT, embora mais homogêneo, em comparação com o resíduo integral, era formado por pequenos fragmentos de casca, polpa residual e sementes, que se agruparam em uma estrutura compactada, pouco porosa, que evidentemente desempenhou um papel relevante no processo de secagem, impedindo uma maior perda de água e, como resposta, resultou em menores taxas de secagem. Por outro lado, o RE apresentou, nos instantes iniciais de secagem, um tipo de expansão volumétrica (dados não mostrados), indicando a existência de uma barreira física em sua superfície, formada possivelmente por pequenos fragmentos de casca, que dificultou a transferência de massa, na forma de vapor, entre o RE e o ar de secagem. Contudo, esse fenômeno ocorreu por mais tempo nas secagens nas temperaturas de 50 e 60 °C, enquanto, nas temperaturas de 70 e 80 °C, a superfície do RE, embora também apresentasse certa expansão, esta era menos pronunciada e tinha menor duração, possivelmente, devido à rápida evaporação da água na superfície ter provocado o colapso de sua estrutura, certa contração (encolhimento) anisotrópica em relação à parede das bandejas, o que levou a exposição das camadas internas do RE ao ar de secagem. Aparentemente, o encolhimento devido à perda de água foi mais importante do que o efeito

da expansão associada à resistência a saída de vapor de água na superfície do RE. De todo modo, esses fenômenos combinados refletiram diretamente em maiores valores de taxas de secagem observadas. No entanto, para obter melhores *insights* sobre esse assunto, o conhecimento dos balanços de calor e massa na superfície e no interior do RE são críticos. Para esse fim, experimentos mais completos podem ser elaborados, nos quais a modelagem computacional pode fornecer informações complementares essenciais.

3.2. Modelagem matemática dos dados experimentais da cinética de secagem

Os dados de teor de água obtidos no processo de secagem foram convertidos em RX (Equação (1)) e ajustados aos dez modelos matemáticos de secagem listados na Tabela 1. Na Tabela 2, são mostrados os coeficientes dos modelos e os parâmetros usados para avaliar a qualidade de ajuste (R^2 , DQM e χ^2) às curvas de secagem dos dados experimentais do RI, RT e RE, na faixa de temperatura (50-80 °C) do ar das experiências. Pode ser observado, na Tabela 2, que a qualidade de ajuste dos modelos depende do tipo de pré-tratamento que o resíduo de cumbeba foi submetido. Para o RI e RT todos os modelos apresentaram valores elevados de R^2 ($> 0,990$) e baixos de DQM ($< 0,0344$) e χ^2 ($< 0,0013$). Entre os modelos, o de Midilli (modelo 10) e de Aproximação da difusão (modelo 7) apresentaram os maiores valores de R^2 (0,9984-0,9991 e 0,9982-0,9989, respectivamente) e menores valores de DQM (0,0106-0,0147 e 0,0119-0,0158, respectivamente) e χ^2 (0,0001-0,0003 e 0,0002-0,0003, respectivamente). Contudo, para o RE, o modelo de Midilli (modelo 10) foi o único a apresentar, em todas as temperaturas de secagem estudadas, valores de R^2 superiores a 0,990 com correspondentes valores de DQM e χ^2 inferiores a 0,0233 e 0,0007, respectivamente. Embora a adequação do modelo de Aproximação da difusão (modelo 7) fosse comparável ao modelo de Midilli (modelo 10), quando analisado todas as condições de secagem, o último modelo estava mais de acordo com os dados experimentais.

Tabela 2. Resultados das análises estatísticas para os modelos ajustados aos dados da cinética de secagem convectiva do resíduo de cumbeba

Modelo	Trat.	Temp. (°C)	Parâmetros do modelo	R ²	DQM	χ ²
1	RI	50	k: 0,2557	0,9958	0,0238	0,0006
		60	k: 0,3637	0,9963	0,0221	0,0005
		70	k: 0,4467	0,9918	0,0334	0,0012
		80	k: 0,6084	0,9913	0,0344	0,0012
	RT	50	k: 0,1436	0,9943	0,0254	0,0007
		60	k: 0,2000	0,9945	0,0261	0,0007
		70	k: 0,2510	0,9946	0,0259	0,0007
		80	k: 0,3241	0,9941	0,0268	0,0007
	RE	50	k: 0,1555	0,9910	0,0339	0,0012
		60	k: 0,2600	0,9895	0,0359	0,0013
		70	k: 0,4415	0,9778	0,0545	0,0031
		80	k: 0,6775	0,9769	0,0579	0,0035
RI	50	k: 0,2178; n: 1,1190	0,9980	0,0166	0,0003	
	60	k: 0,3248; n: 1,1121	0,9984	0,0144	0,0002	
	70	k: 0,3777; n: 1,2049	0,9979	0,0171	0,0003	
	80	k: 0,5455; n: 1,2147	0,9983	0,0153	0,0003	
2	RT	50	k: 0,1519; n: 0,9742	0,9948	0,0253	0,0007
		60	k: 0,2070; n: 0,9787	0,9946	0,0258	0,0007
		70	k: 0,2446; n: 1,0185	0,9947	0,0257	0,0007
		80	k: 0,3141; n: 1,0272	0,9942	0,0264	0,0007
RE	50	k: 0,1313; n: 1,0896	0,9927	0,0305	0,0010	
	60	k: 0,2227; n: 1,1155	0,9922	0,0310	0,0010	
	70	k: 0,3416; n: 1,3042	0,9925	0,0318	0,0011	
	80	k: 0,5796; n: 1,3924	0,9959	0,0243	0,0006	
3	RI	50	a: 1,0111; k: 0,2595	0,9960	0,0233	0,0006
		60	a: 1,0141; k: 0,3705	0,9965	0,0212	0,0005
		70	a: 1,0366; k: 0,4675	0,9935	0,0298	0,0010
		80	a: 1,0438; k: 0,6422	0,9936	0,0295	0,0009
RT	50	a: 0,9834; k: 0,1411	0,9951	0,0245	0,0006	
	60	a: 0,9807; k: 0,1946	0,9951	0,0246	0,0006	
	70	a: 0,9910; k: 0,2479	0,9948	0,0256	0,0007	
	80	a: 0,9940; k: 0,3215	0,9941	0,0266	0,0008	
3	RE	50	a: 0,9964; k: 0,1547	0,9911	0,0338	0,0012
		60	a: 1,0038; k: 0,2613	0,9896	0,0359	0,0014
		70	a: 1,0424; k: 0,4648	0,9807	0,0509	0,0028
		80	a: 1,0690; k: 0,7341	0,9826	0,0503	0,0028
4	RI	50	a: 1,6217; k: 0,3307	0,9983	0,0149	0,0002
		60	a: 1,6124; k: 0,4668	0,9988	0,0127	0,0002
		70	a: 1,0000; k: 0,4467	0,9918	0,0334	0,0012
		80	a: 1,7470; k: 0,8477	0,9982	0,0158	0,0003
RT	50	a: 1,2306; k: 0,1512	0,9946	0,0257	0,0007	
	60	a: 0,9999; k: 0,2000	0,9945	0,0261	0,0007	
	70	a: 0,9999; k: 0,2510	0,9946	0,0259	0,0007	
	80	a: 1,4397; k: 0,3747	0,9947	0,0252	0,0007	

Continuação da Tabela 2.

Modelo	Trat.	Temp. (°C)	Parâmetros do modelo	R ²	DQM	χ ²
4	RE	50	a: 0,9999; k: 0,1555	0,9910	0,0339	0,0012
		60	a: 1,6110; k: 0,3335	0,9931	0,0292	0,0004
		70	a: 1,0000; k: 0,4415	0,9778	0,0545	0,0033
		80	a: 0,9999; k: 0,6776	0,9769	0,0579	0,0037
	RI	50	a: -2782,26; b: 26,677	0,9958	0,0238	0,0006
		60	a: -2066,58; b: 27,420	0,9963	0,0221	0,0005
		70	a: -1970,75; b: 29,674	0,9918	0,0334	0,0012
		80	a: -2031,53; b: 35,158	0,9913	0,0344	0,0013
5	RT	50	a: -1998,18; b: 16,989	0,9946	0,0257	0,0007
		60	a: -1855,69; b: 19,268	0,9945	0,0261	0,0007
		70	a: -2174,16; b: 23,361	0,9946	0,0259	0,0007
		80	a: -2069,70; b: 25,900	0,9941	0,0268	0,0008
	RE	50	a: -2665,05; b: 20,359	0,9910	0,0339	0,0012
		60	a: -2196,12; b: 23,897	0,9895	0,0359	0,0014
		70	a: -2212,75; b: 31,259	0,9993	0,0545	0,0033
		80	a: -1602,75; b: 32,955	0,9769	0,0579	0,0037
RI	50	a: 1,0334; k: 0,2415; c: -0,0291	0,9975	0,0184	0,0004	
	60	a: 1,0370; k: 0,3446; c: -0,0298	0,9979	0,0164	0,0003	
	70	a: 1,0599; k: 0,4350; c: -0,0304	0,9952	0,0256	0,0007	
	80	a: 1,0691; k: 0,5913; c: -0,0340	0,9956	0,0244	0,0007	
6	RT	50	a: 1,0224; k: 0,1237; c: -0,0510	0,9970	0,0192	0,0004
		60	a: 1,0125; k: 0,1746; c: -0,0420	0,9970	0,0225	0,0006
		70	a: 1,0258; k: 0,2218; c: -0,0450	0,9970	0,0193	0,0004
		80	a: 1,0379; k: 0,2817; c: -0,0558	0,9969	0,0193	0,0004
	RE	50	a: 1,0799; k: 0,1224; c: -0,1030	0,9974	0,0182	0,0004
		60	a: 1,0873; k: 0,2103; c: -0,1012	0,9959	0,0224	0,0006
		70	a: 1,1617; k: 0,3478; c: -0,1438	0,9916	0,0335	0,0013
		80	a: 1,1188; k: 0,6342; c: -0,0651	0,9880	0,0418	0,0020
RI	50	a: -117,66; k: 0,4009; b: 0,9958	0,9985	0,0141	0,0002	
	60	a: -173,66; k: 0,5633; b: 0,9972	0,9989	0,0119	0,0002	
	70	a: -212,58; k: 0,7682; b: 0,9970	0,9982	0,0158	0,0003	
	80	a: -212,49; k: 1,0585; b: 0,9970	0,9985	0,0145	0,0002	
7	RT	50	a: -50,688; k: 0,1641; b: 0,9974	0,9947	0,0256	0,0007
		60	a: -50,007; k: 0,1389; b: 1,0070	0,9954	0,0240	0,0006
		70	a: -49,998; k: 0,1633; b: 1,0084	0,9965	0,0209	0,0005
		80	a: -48,998; k: 0,2039; b: 1,0093	0,9964	0,0181	0,0005
	RE	50	a: -216,957; k: 0,2327; b: 0,9979	0,9939	0,0279	0,0008
		60	a: -216,022; k: 0,1426; b: 1,0028	0,9962	0,0217	0,0005
		70	a: -216,050; k: 0,2060; b: 1,0037	0,9928	0,0310	0,0011
		80	a: -215,999; k: 0,3669; b: 1,0029	0,9879	0,0419	0,0020
RI	50	a: 0,3370; k: 0,2595; b: 0,3370; c: 0,3370	0,9960	0,0233	0,0006	
	60	a: 0,3380; k: 0,3705; b: 0,3380; c: 0,3380	0,9965	0,0212	0,0005	
	70	a: 0,3455; k: 0,4675; b: 0,3455; c: 0,3455	0,9935	0,0298	0,0010	
	80	a: 0,3479; k: 0,6422; b: 0,3479; c: 0,3479	0,9936	0,0295	0,0010	
8	RT	50	a: 0,3278; k: 0,1411; b: 0,3278; c: 0,3278	0,9975	0,0245	0,0007
		60	a: 0,3269; k: 0,1946; b: 0,3269; c: 0,3269	0,9951	0,0246	0,0007

Continuação da Tabela 2.

Modelo	Trat.	Temp. (°C)	Parâmetros do modelo	R ²	DQM	χ ²
8	RT	70	a: 0,3303; k: 0,2479; b: 0,3303; c: 0,3303	0,9948	0,0256	0,0007
		80	a: 0,3313; k: 0,3215; b: 0,3313; c: 0,3313	0,9941	0,0266	0,0008
		50	a: 0,3321; k: 0,1547; b: 0,3321; c: 0,332135	0,9911	0,0338	0,0013
	RE	60	a: 0,3346; k: 0,2613; b: 0,3346; c: 0,334604	0,9896	0,0359	0,0015
		70	a: 0,3474; k: 0,4648; b: 0,3474; c: 0,3474	0,9807	0,0509	0,0031
		80	a: 0,3563; k: 0,7341; b: 0,3563; c: 0,3563	0,9826	0,0503	0,0031
	RI	50	a: 0,5055; k ₀ : 0,2595; b: 0,5055; k ₁ : 0,2595	0,9960	0,0233	0,0006
		60	a: 0,5070; k ₀ : 0,3705; b: 0,5070; k ₁ : 0,3705	0,9965	0,0212	0,0005
		70	a: 0,5183; k ₀ : 0,4675; b: 0,5183; k ₁ : 0,4675	0,9935	0,0298	0,0010
9	RT	80	a: 0,5219; k ₀ : 0,6422; b: 0,5219; k ₁ : 0,6422	0,9936	0,0295	0,0010
		50	a: 0,4917; k ₀ : 0,1411; b: 0,4917; k ₁ : 0,1411	0,9951	0,0245	0,0007
		60	a: 0,4903; k ₀ : 0,1946; b: 0,4903; k ₁ : 0,1946	0,9951	0,0246	0,0007
	RE	70	a: 0,4955; k ₀ : 0,2479; b: 0,4955; k ₁ : 0,2479	0,9948	0,0256	0,0007
		80	a: 0,4970; k ₀ : 0,3215; b: 0,4970; k ₁ : 0,3215	0,9941	0,0265	0,0008
		50	a: 0,4982; k ₀ : 0,1547; b: 0,4982; k ₁ : 0,1547	0,9911	0,0338	0,0013
	RI	60	a: 0,5019; k ₀ : 0,2613; b: 0,5019; k ₁ : 0,2613	0,9896	0,0355	0,0015
		70	a: 0,5212; k ₀ : 0,4648; b: 0,5212; k ₁ : 0,4648	0,9807	0,0509	0,0031
		80	a: 0,5345; k ₀ : 0,7341; b: 0,5345; k ₁ : 0,7341	0,9826	0,0503	0,0031
10	RT	50	a: 0,9679; k: 0,1876; n: 1,1890; b: -0,0004	0,9989	0,0119	0,0002
		60	a: 0,9734; k: 0,2935; n: 1,1658; b: -0,0006	0,9991	0,0106	0,0001
		70	a: 0,9745; k: 0,3442; n: 1,2664; b: -0,0005	0,9984	0,0147	0,0003
	RE	80	a: 0,9812; k: 0,5168; n: 1,2536; b: -0,0009	0,9987	0,0136	0,0002
		50	a: 1,0070; k: 0,1739; n: 0,8473; b: -0,0037	0,9985	0,0136	0,0002
		60	a: 0,9898; k: 0,2084; n: 0,9250; b: -0,0026	0,9973	0,0184	0,0004
	RI	70	a: 0,9829; k: 0,2337; n: 1,0007; b: -0,0023	0,9967	0,0202	0,0005
		80	a: 0,9850; k: 0,3004; n: 0,9987; b: -0,0040	0,9966	0,0202	0,0005
		50	a: 0,9658; k: 0,1170; n: 1,0784; b: -0,0028	0,9972	0,0188	0,0004
RE	60	a: 0,9631; k: 0,1908; n: 1,1444; b: -0,0036	0,9962	0,0218	0,0005	
	70	a: 0,9574; k: 0,2840; n: 1,3915; b: -0,0047	0,9960	0,0233	0,0007	
	80	a: 0,9678; k: 0,5265; n: 1,4833; b: -0,0017	0,9970	0,0205	0,0005	

RI - resíduo não tratado/integral; RT - resíduo triturado; RE - resíduo na forma de espuma.

Como pode ser visto na Tabela 2, os valores de R² para o modelo de Midilli foram maiores que o do modelo de Aproximação da difusão, enquanto os valores dos outros parâmetros estatísticos (DQM e χ²) foram menores. Com base nesses resultados, o modelo Midilli foi escolhido como o melhor modelo para representar a secagem do resíduo de cumbeba nas diferentes condições estudadas. Assim, o teor de água a qualquer momento durante o processo de secagem pode ser estimado com segurança usando o modelo de Midilli. Resultados semelhantes foram encontrados em pesquisas anteriores [122-124].

As Figuras 5a a 5c mostram a adequação do modelo Midilli aos dados experimentais para as temperaturas variando de 50 a 80 °C para o RI, RT e RE. A validação do modelo de

Midilli foi estabelecida pela comparação entre os dados experimentais do teor de água adimensional e aqueles estimados/previstos pelo modelo em qualquer condição de secagem específica. As Figuras 6a a 6c mostram o teor de água adimensional previsto pelo modelo de Midilli versus o teor de água adimensional experimental do RI, RT e RE, nas temperaturas (50 a 80 °C) das experiências. Como é evidente, existe uma correlação adequada entre os valores experimentais e previstos de RX, uma vez que os dados se agrupam em torno da linha reta, que teoricamente representa a igualdade entre valores experimentais e estimados, evidenciando adequação do modelo de Midilli na descrição do comportamento de secagem do RI, RT e RE, na faixa de temperatura avaliada.

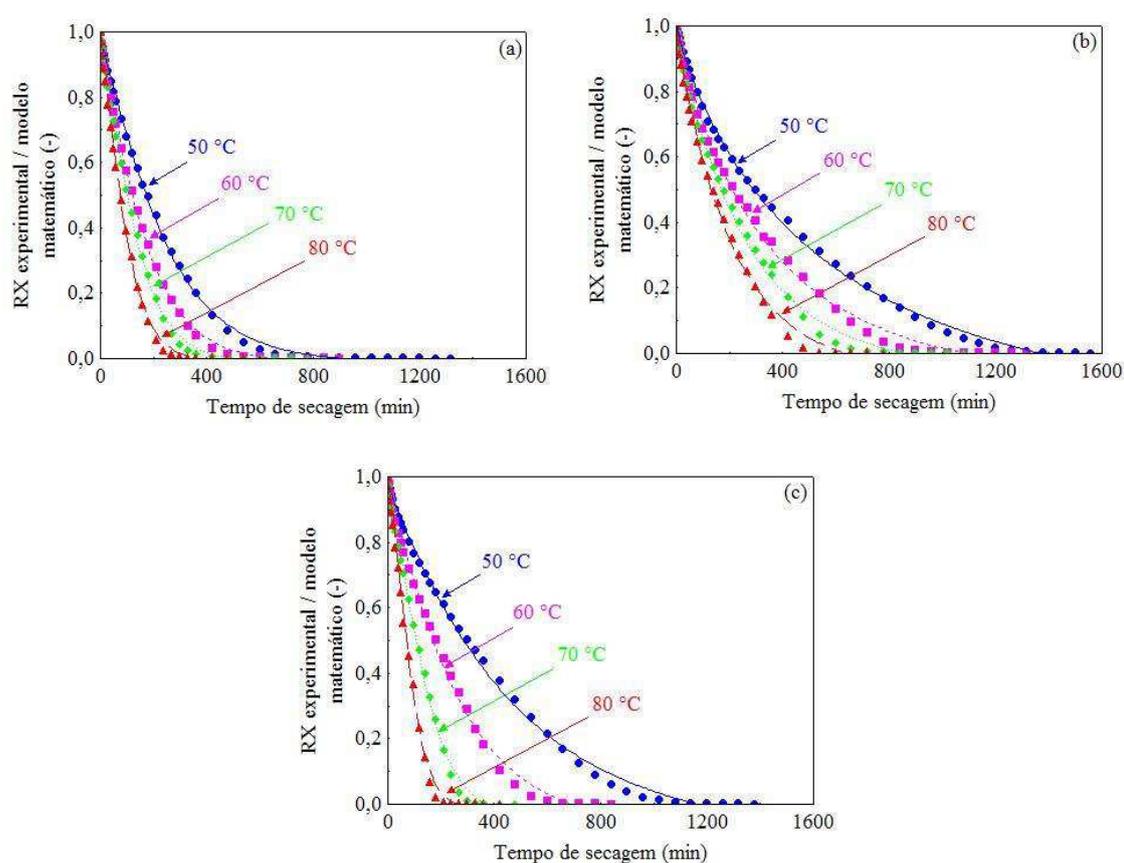


Figura 5. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo matemático de Midilli nas temperaturas de 50-80 °C para o (a) RI, (b) RT e (c) RE: (●) Dados experimentais, (—) Modelo, (■) Dados experimentais, (—) Modelo, (◆) Dados experimentais, (—) Modelo, (▲) Dados experimentais, (—) Modelo

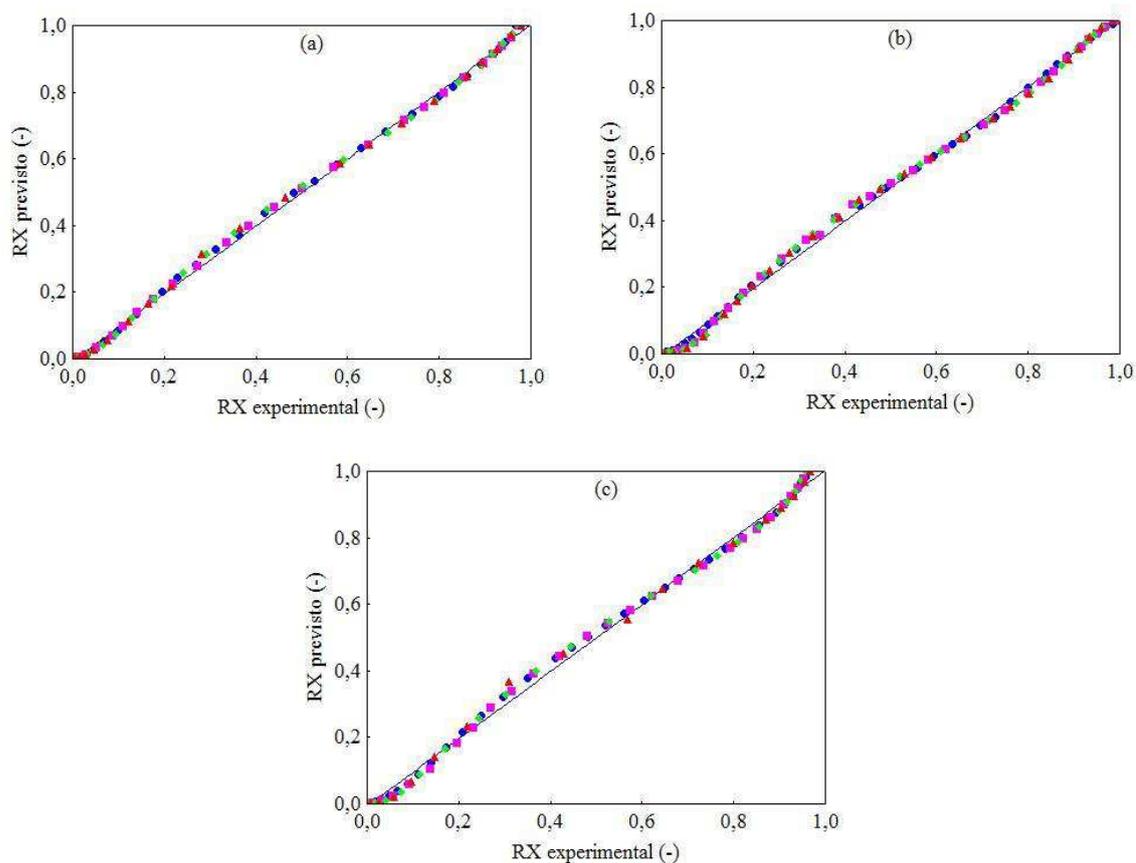


Figura 6. (a) Teor de água adimensional previsto pelo modelo de Midilli versus Teor de água adimensional experimental para o (a) RI, (b) RT e (c) RE (●) 50 °C, (■) 60 °C, (◆) 70 °C, (▲) 80 °C e (—) linha de regressão ($RX_{\text{Predicted}} = RX_{\text{experimental}}$)

3.3. Difusividade efetiva de água (D_{ef}) e energia de ativação (E_a)

A difusividade efetiva de água (D_{ef}) das amostras foi determinada via simulação computacional (consulte a seção 2.4) e os resultados são apresentados na Tabela 3. Em outro estudo Ref. [57] propusemos um modelo de difusão, admitindo condição de contorno convectiva, para descrever a secagem convectiva do resíduo de cumbeba triturado. Os parâmetros de transporte de massa (D_{ef} e h) e energia de ativação (E_a) determinados na Ref. [57] foram usados no presente artigo. Conforme mostrado na Tabela 3, os valores de D_{ef} das amostras foram influenciados pela temperatura de secagem e tipo de pré-tratamento. Os valores de D_{ef} , para o mesmo tipo de pré-tratamento, aumentaram com o aumento da temperatura de secagem de 50 a 80 °C de $6,4890$ a $11,1900 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para o RI, de $2,9285$ a $12,754 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para o RT e de $1,5393 \times 10^{-8}$ a $12,4270 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para o RE. Isso se deve ao fato de que aumentar a temperatura do ar de secagem aumenta a temperatura geral do produto [104], resultando em maior energia cinética das moléculas de água (agitação)

[123,125], como reflexo, facilita a sua difusão em direção as camadas externas do produto [48,126], o que provoca o aumentando dos valores de D_{ef} . Resultados comparáveis sobre a mudança de D_{ef} com a temperatura foram observados por diferentes autores na secagem de diferentes biomassas vegetais [107,126-129].

Tabela 3. Difusividade efetiva de água (D_{ef}), coeficiente convectivo de transferência de massa (h) e energia de ativação para diferentes condições de secagem do resíduo de cumbeba

Trat.	Temp. (°C)	D_{ef} (m ² /s)	h (m/s)	Bi (-)	R^2 (-)	$\chi^2 \times 10^{-2}$ (-)
RI	50	$6,489 \times 10^{-6}$	$6,791 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-3}$	0,9970	2,088
	60	$5,574 \times 10^{-6}$	$1,021 \times 10^{-6}$	$1,75 \times 10^{-3}$	0,9969	1,378
	70	$8,221 \times 10^{-6}$	$1,290 \times 10^{-6}$	$1,50 \times 10^{-3}$	0,9948	2,413
	80	$1,119 \times 10^{-5}$	$1,756 \times 10^{-6}$	$1,50 \times 10^{-3}$	0,9955	1,979
RT*	50	$2,928 \times 10^{-9}$	$6,436 \times 10^{-7}$	2,10	0,9962	2,282
	60	$4,169 \times 10^{-9}$	$8,727 \times 10^{-7}$	2,00	0,9962	2,117
	70	$8,139 \times 10^{-9}$	$8,944 \times 10^{-7}$	1,05	0,9957	2,143
	80	$1,275 \times 10^{-8}$	$10,912 \times 10^{-7}$	0,82	0,9951	1,973
RE	50	$1,539 \times 10^{-8}$	$4,510 \times 10^{-7}$	0,28	0,9927	4,353
	60	$6,596 \times 10^{-6}$	$6,904 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-3}$	0,9916	3,741
	70	$3,250 \times 10^{-6}$	$1,190 \times 10^{-6}$	$3,50 \times 10^{-3}$	0,9863	6,539
	80	$1,242 \times 10^{-5}$	$1,950 \times 10^{-6}$	$1,50 \times 10^{-3}$	0,9878	5,596

RI - resíduo não tratado/integral; RT - resíduo triturado; RE - resíduo na forma de espuma. * Valores determinados por Ferreira et al. [57] para a secagem do resíduo triturado foram usados neste artigo.

Em relação ao tipo de pré-tratamento, curiosamente verificou-se que, nas temperaturas de 50 °C e, também, 70 °C, os valores de D_{ef} do RI foram mais altos, seguido pelo RE e RT. Por outro lado, nas temperaturas de 60 e 80 °C, esse comportamento foi invertido, com o RE apresentando os maiores valores de D_{ef} . Embora esse resultado tenha sido consistente com o fato de que, na temperatura de 80 °C, a estrutura porosa da espuma aumentou a taxa de remoção de água e, como consequência, reduziu o tempo de secagem, acreditamos que a falta de tendência dos valores de D_{ef} observada entre o RI e RE pode ser creditada, possivelmente, a heterogeneidade do resíduo de cumbeba, reflexo das diferentes composições químicas e distribuição desuniforme dos seus constituintes (casca, resto de polpa e sementes) nos experimentos de secagem (dados não mostrados).

As D_{ef} determinadas, variando entre 10^{-9} e 10^{-5} m^2/s , são próximas ou superiores à faixa reportada por Madamba et al. [130] para frutas, a qual, segundo os autores, situa-se entre 10^{-11} e 10^{-9} m^2/s . Neste caso, deve-se levar em conta outros fatores que igualmente influenciam a D_{ef} , como o encolhimento durante a secagem [131,132], a distribuição inicial de água no produto, conforme Younis et al. [133], a temperatura e/ou composição [110,134,135], que no caso da casca de cumbeba possivelmente apresenta permeabilidade seletiva à água como mecanismo de adaptação da espécie ao clima semiárido. Além disso, esse desvio pode ser atribuído ao fato de que o resíduo de cumbeba, quando comparado com amostras de frutas e legumes, apresenta uma estrutura mais porosa e exibe uma grande área superficial, o que facilita as transferências de calor e massa na forma de vapor de água dentro das amostras. Uma tendência semelhante foi encontrada durante a secagem de resíduo de uva [136] e do subproduto do processamento de polpa de uvaia (*Eugenia pyriformis*) [60].

É interessante mencionar que os valores dos coeficientes convectivos de transferência de massa (h) (consulte a Tabela 3), também apresentaram, independente do pré-tratamento que o resíduo de cumbeba tenha sido submetido, tendência de aumento com a elevação da temperatura, indicando que o ar de secagem apresenta maior capacidade para remover a umidade da superfície das amostras à medida que a sua temperatura aumenta. Por outro lado, os baixos valores de número de Biot (Bi) (0.001-2.100), obtidos nas diferentes condições experimentais, indica que existe uma resistência ao fluxo de massa (água) na superfície das amostras e, portanto, demonstra que a solução da equação de difusão (Equação 6) considerando condição de contorno de terceiro tipo, mesmo com limitações, pois não considera a variação nas dimensões do produto e as não linearidades das propriedades termo-físicas, é razoavelmente adequada para descrever o processo de secagem do resíduo de cumbeba, especialmente, para o resíduo integral e triturado ($R^2 \geq 0.9948$, ver Tabela 3).

As energias de ativação (E_a) foram determinadas ajustando a Equação 12 por regressão não linear simples aos pares ordenados (T , D_{ef}) para cada tipo de pré-tratamento (Tabela 4). Conforme apresentado na Tabela 4, as energias de ativação foram determinadas em 22,3078, 46,7115 e 58,0736 kJ/mol para o RI, RT e RE, respectivamente. O RE apresentou o maior valor de E_a , indicando que a difusividade efetiva da espuma foi mais sensível à mudança de temperatura, em comparação com o RI e RT. Os valores de energia de ativação encontrados (22,3078-58,0736 kJ/mol) estão na faixa dos valores relatados para biomassas vegetais (12,7-110 kJ/mol) [137].

Tabela 4. Energias de ativação da difusão de água

Tratamento	D ₀ (m ² /s)	E _a (kJ/mol)	R ² (-)
RI	2,136 × 10 ⁴	22,307	0,9064
RT	1,023 × 10 ⁻¹	46,711	0,9930
RE	4,407 × 10 ⁹	58,073	0,8458

RI - resíduo não tratado/integral; RT - resíduo triturado; RE - resíduo na forma de espuma. * Valores determinados por Ferreira et al. [57] para a secagem do resíduo triturado foram usados neste artigo.

3.4. Efeito das condições de secagem no nível de compostos bioativos do resíduo de cumbeba

3.4.1. Compostos fenólicos totais (CFT)

O conteúdo de compostos fenólicos do resíduo foi significativamente ($p < 0.05$) afetado pelas condições de secagem. Em geral, o conteúdo de compostos fenólicos variou com a condição de secagem; em ordem decrescente: RI seco a 80 °C > RT seco a 80 °C > RI seco a 70 °C > RE seco 80 °C > RT seco a 70 °C > RI seco a 60-50 °C > amostra fresco > RT seco a 60 °C > RE seco a 70 °C > RT seco a 50 °C > RE seco a 60-50 °C (Tabela 5). Um aumento estatisticamente significativo ($p < 0.05$) no conteúdo de fenólicos, em comparação com a amostra fresca (436,719 mg de EAG/100 g de matéria seca), pode ser observado para todos os tratamentos, com exceção do RT e RE em que a concentração de fenólicos só foi maior do que da amostra fresca a partir das temperaturas de 70 e 80 °C, respectivamente (Tabela 5). Além disso, com a elevação da temperatura de 50 para 80 °C foi observado um aumento de 23,65% no conteúdo de compostos fenólicos do RI, enquanto um aumento de 33,24% e 36,21% foi registrado para o RT e na RE, respectivamente. No presente estudo, o RI seco na temperatura de 80 °C permitiu uma maior recuperação de fenólicos totais (585,171 mg de EAG/100 g de matéria seca), correspondendo a um aumento de cerca de 25,40%, em relação ao resíduo fresco, o que está de acordo com observações de pesquisas anteriores [41,53,71,138]. O aumento dos compostos fenólicos pode ser devido, possivelmente, pela liberação de compostos fenólicos de estruturas celulares vegetais, inativação de enzimas endógenas (hidrolíticas e oxidativas) e/ou formação de novos compostos fenólicos [36,39,40,139], como resultado do processo de secagem [38,42,140].

Tabela 5. Compostos bioativos do resíduo fresco e seco sob diferentes condições de secagem

Condição de secagem	CFT	FT	AT	BT		
				Betax.	Betac.	
Amostra fresca	436,71±2,68 ^h	59,31±0,03 ^a	1,44±0,03 ^a	15,79±0,22 ^a	3,16±0,15 ^a	
RI	50 °C	446,78±0,55 ^g	6,78±0,01 ^h	0,15±0,011 ^{fg}	6,75±0,06 ^g	1,27±0,00 ^{hi}
	60 °C	485,04±0,97 ^f	8,44±0,01 ^f	0,28±0,00 ^c	7,25±0,02 ^e	1,34±0,03 ^{hi}
	70 °C	535,98±1,01 ^c	9,47±0,04 ^d	0,23±0,01 ^{de}	8,32±0,02 ^c	1,62±0,00 ^{dfe}
	80 °C	585,17±0,99 ^a	11,16±0,01 ^b	0,32±0,01 ^b	9,32±0,02 ^b	1,75±0,03 ^{cd}
RT	50 °C	370,11±0,96 ^k	6,54±0,01 ⁱ	0,12±0,01 ^g	6,30±0,02 ^h	1,23±0,03 ⁱ
	60 °C	422,85±0,55 ⁱ	6,89±0,01 ^g	0,15±0,01 ^{fg}	6,72±0,04 ^g	1,44±0,10 ^{egh}
	70 °C	488,84±1,00 ^e	9,73±0,01 ^c	0,20±0,01 ^e	7,11±0,02 ^{ef}	1,67±0,00 ^{df}
	80 °C	554,41±0,58 ^b	9,10±0,01 ^e	0,25±0,01 ^{cd}	7,86±0,04 ^d	2,39±0,00 ^b
RE	50 °C	325,57±2,04 ^m	4,16±0,01 ^l	0,13±0,00 ^g	6,98±0,02 ^f	1,42±0,03 ^{ghi}
	60 °C	347,19±1,12 ^l	4,17±0,01 ^l	0,12±0,00 ^g	7,10±0,02 ^{ef}	1,57±0,03 ^{dfe}
	70 °C	417,94±1,54 ^j	4,63±0,01 ^k	0,14±0,01 ^{fg}	7,23±0,10 ^e	1,56±0,07 ^{fe}
	80 °C	510,41±0,58 ^d	5,41±0,01 ^j	0,16±0,01 ^f	7,86±0,02 ^d	1,90±0,03 ^c

RI - resíduo não tratado/integral; RT - resíduo triturado; RE - resíduo na forma de espuma; CFT - compostos fenólicos totais (mg EAG/100 g de matéria seca); FT - flavonoides totais (mg/100 g de matéria seca); AT - antocianinas totais (mg/100 g de matéria seca); BT - betalaínas totais (Betaxantinas + Betacianinas) (mg/100 g de matéria seca); Betax. - betaxantinas (mg/100 g de matéria seca); Betac. - betacianinas (mg/100 g de matéria seca). Os valores são média ± desvio padrão da determinação em quadruplicata. Médias com a mesma letra na mesma coluna não indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O resíduo de cumbeba fresco apresentou um conteúdo de flavonoides e antocianinas de 59,31 mg/100 g de matéria seca e 1,44 mg/100 g de matéria seca, respectivamente, enquanto o resíduo seco apresentou conteúdo de flavonoides entre os limites 4,16-11,16 mg/100 g de matéria seca e de antocianinas entre os limites 0,08-0,32 mg/100 g de matéria seca (Tabela 5). As amostras mostraram a seguinte classificação para flavonoides; em ordem decrescente: amostra fresca > RI seco a 80 °C > RT seco a 70 °C > RI seco a 70 °C > RT seco a 80 °C > RI seco a 60 °C > RT seco a 60 °C > RI seco a 50 °C > RT seco a 50 °C > RE seco a 80-50 °C. Enquanto isso o conteúdo de antocianinas variou de acordo com, em ordem decrescente: amostra fresca > RI seco a 80 °C > RI seco a 60 °C > RT seco a 80 °C

> RI seco a 70 °C > RT seco a 70 °C > RI seco a 50 °C = RT seco a 60 °C > RE seco a 80-70 °C > RE seco a 50 °C > RT seco a 50 °C > RE seco a 60 °C.

A partir da análise da Tabela 5, nota-se que as maiores perdas de flavonoides e antocianinas ocorreram, para todos os tipos de amostra, em relação ao resíduo fresco, na secagem na temperatura de 50 °C, indicando que esses compostos são sensíveis a longa exposição às condições do processo de secagem; por exemplo, as reduções de flavonoides foram de 88,56 (1320 min), 85,76 (900 min), 84,02 (840 min) e 81,18% (600 min) (RI), 88,97 (1560 min), 88,37 (1320 min), 83,59 (1080 min) e 84,65% (780 min) (RT) e 92,98 (1380 min), 92,96 (840 min), 92,19 (480 min) e 90,88% (420 min) (RE) a 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente. Enquanto as reduções de antocianinas foram de 85,57, 80,32, 84,21 e 77,68% (RI), 91,31, 89,57, 85,82 e 81,20% (RT) e 90,96, 91,72, 83,30 e 86,66% (RE) a 50, 60, 70 e 80 °C, respectivamente. A diminuição desses compostos após a secagem, em relação ao material fresco, também foi observada em estudos anteriores [69,70].

Embora tenha sido observado que os flavonoides e as antocianinas foram os compostos mais sensíveis à secagem, com o aumento da temperatura de 50 para 80 °C, independentemente do tipo de pré-tratamento ocorre, de forma geral, uma retenção significativa ($p < 0,05$) de flavonoides e antocianinas nas amostras. Enquanto o RI resultou em um aumento no conteúdo de flavonoides e antocianinas, nesta ordem, de 36,66% e 53,27%, o RT e RE apresentaram um aumento de 28,10% e 51,17% e 23,04% e 20,25%, respectivamente (Tabela 5). Nesse sentido, parece provável que o encurtamento do tempo de secagem e, possivelmente da atividade de água, produzido pelo uso de altas temperaturas de secagem diminuiu a extensão das reações de degradação. Além disso, no presente estudo, os resultados sugerem que a degradação dos flavonoides totais e das antocianinas, observada em relação ao resíduo fresco, parece ser mais dependente do tempo do que da temperatura do ar de secagem. Uma possível explicação para este resultado é que a redução no conteúdo de flavonoides pode, em certos casos, ser devido a seu envolvimento em reações de complexação com outras substâncias e/ou a oxidação química dessas moléculas, que estão associadas a longos períodos de exposição às condições do ar de secagem [112,141].

Na Tabela 5, o conteúdo de betalaínas total do resíduo fresco (18,956 mg/100 g de matéria seca) é representado, principalmente, pela classe das betaxantinas (83,34%), sendo o restante (16,66%) representado pelas betacianinas (Tabela 5). O resíduo de cumbeba apresentou um conteúdo de betaxantinas variando; em ordem decrescente: amostra fresca > RI seco a 80 °C > RI seco a 70 °C > RT seco a 80 °C = RE seco a 80 °C > RI seco a 60 °C > RE seco a 70 °C > RT seco a 70 °C > RE seco a 70 °C > RE seco a 50 °C > RI seco a 50

°C > RT seco a 60 °C > RT seco a 50 °C. Por outro lado, a ordem decrescente dos valores de betacianinas no resíduo seco foi: amostra fresca > RT seco a 80 °C > RE seco a 80 °C > RI seco a 80 °C > RT seco a 70 °C > RI seco a 70 °C > RE seco a 60-70 °C > RT seco a 60 °C > RE seco a 50 °C > RI seco a 60-50 °C > RT seco a 50 °C.

O conteúdo de betalaínas (betaxantinas e betacianinas) do resíduo seco foi significativamente menor ($p < 0,05$) em comparação com o resíduo fresco (ver Tabela 5). O teor de betaxantinas sofreu uma redução de 60,12-41,02% após a secagem a 50-80°C, enquanto foi observada uma redução de 60,78-24,12% nas betacianinas. Este decréscimo pode ser devido à decomposição desses compostos antioxidantes após ser exposto ao aquecimento no processo de secagem [142,143]. Contudo, destaca-se que, para um mesmo tipo de pré-tratamento, houve um comportamento de retenção com a elevação da temperatura, efeito similar ao observado para os demais bioativos analisados. Embora tenha sido relatado que a exposição a temperaturas elevadas causa a degradação das betalaínas [143,144], não parece ser suficiente para estabelecer um consenso definitivo sobre sua sensibilidade a alterações durante a secagem e como a matriz do produto pode afetar essa sensibilidade. Os resultados parecem fornecer suporte para a hipótese de que, como as betalaínas são moléculas antioxidantes [145,146], a exposição prolongada ao oxigênio parece ser o fator chave para sua degradação. Além disso, o RI seco mostrou, de forma global, um conteúdo de betaxantinas (6,752-9,317 mg/ 100 g de matéria seca) maior do que o RT seco (6,300-7,867 mg/ 100 g de matéria seca) e RE seco (6,981-7,865 mg/ 100 g de matéria seca). Quanto às betacianinas, o RT seco apresentou um conteúdo (1,239-2,397 mg/ 100 g de matéria seca) maior em comparação com RE seco (1,419-1,901 mg/100 g de matéria seca) e o RI seco (1,268-1,756 mg/100 g de matéria seca), embora essas diferenças nem sempre foram significativas.

4. Conclusões

A secagem do resíduo de cumbeba ocorreu predominantemente em taxa decrescente e o modelo de Midilli foi o que melhor descreveu o processo em todas as condições avaliadas. Os valores de difusividade efetiva de água e coeficiente convectivo de transferência de massa aumentaram com o aumento da temperatura de secagem. A energia de ativação variou na seguinte ordem: resíduo em forma de espuma > resíduo triturado > resíduo inteiro. A secagem convectiva foi eficaz na recuperação de compostos fenólicos em resíduo de cumbeba, com melhores resultados a 80 °C. A secagem do resíduo, independente

do pré-tratamento, resultou em menores valores de flavonóides, antocianinas e betalaínas em relação ao resíduo fresco, sendo essa diferença estatisticamente significativa. Porém, o aumento da temperatura aumentou a recuperação desses compostos bioativos durante a extração. Pré-tratamentos de trituração e transformação em espuma não promoveu vantagem para a extração de compostos bioativos em comparação ao resíduo não tratado. A secagem convectiva do resíduo integral é uma boa alternativa para reaproveitar e agregar valor ao resíduo de cumbeba, pois possibilitou a obtenção de um produto que pode ser utilizado como fonte de altos teores de compostos bioativos, principalmente compostos fenólicos.

Referências

1. Souza, A.C.M.; Gamarra-Rojas, G.; Andrade, S.A.C.; Guerra, N.B. Características físicas, químicas e organolépticas de quipá (*Tacinga inamoena*, Cactaceae). Rev. Bras. Frutic. 2007, 29, 292-295, doi:10.1590/s0100-29452007000200020.
2. Silva, S.M.; Brito-Primo, D.M.; Torres, L.B.V.; Martins, L.P.; Lima, A.B.; Silva, F.V.G. Features of postharvest physiology and quality of Cactaceae fruits from Brazilian Northeast. Acta Hortic. 2009, 811, 113-122, doi:10.17660/actahortic.2009.811.11.
3. Nascimento, V.T.; Moura, N.P.; Vasconcelos, M.A.S.; Maciel, M.I.S.; Albuquerque, U.P. Chemical characterization of native wild plants of dry seasonal forests of the semi-arid region of northeastern Brazil. Food Res. Int. 2011, 44, 2112-2119, doi:10.1016/j.foodres.2010.12.024.
4. Dantas, R.L.; Shunemann, A.P.; Silva, S.M.; Melo, R.S.; Silva, R.S.; Souza, F.A.R.M. Quality and descriptive terminology of *Tacinga inamoena* (k. Schum.) fruits. Acta Hortic. 2015, 58, 143-149, doi:10.17660/actahortic.2015.1067.19.
5. Dantas, R.L.; Silva, S.M.; Santos, L.F.; Dantas, A.L.; Lima, R.P.; Soares, L.G. Betalains and antioxidant activity in fruits of Cactaceae from Brazilian Semiarid. Acta Hortic. 2015, 58, 151-157, doi:10.17660/actahortic.2015.1067.20.
6. Formiga, A.S.; Costa, F.B.; Silva, M.S.; Pereira, E.M.; Brasil, Y.L. Aspectos físicos e químicos de frutos de quipá (*Tacinga inamoena*). Rev. Verde Agroecol. Desenvolv. Sustentável 2016, 11, 25-29, doi:10.18378/rvads.v11i5.4559.
7. Lima, R.K.B.; Sarmiento, J.D.A.; Neta, T.R.; Morais, P.L.D.; Silva, G.G.; Sarmiento, D.H.A. Caracterização dos frutos do pelo (*Tacinga inamoena*) e do mandacaru (*Cereus jamacaru*). In Coleção Agroecologia e Meio Ambiente no Semiárido:

- Produção Orgânica no Semiárido; Universidade Federal Rural do Semi-Árido (EDUFERSA): Mossoró, Brazil, 2016; Volume 3, pp. 335-344, ISBN 978-85-5757-063-4.
8. Plaza, M.; Batista, A.G.; Cazarin, C.B.B.; Sandahl, M.; Turner, C.; Östman, E.; Júnior, M.R.M. Characterization of antioxidant polyphenols from *Myrciaria jaboticaba* peel and their effects on glucose metabolism and antioxidant status: A pilot clinical study. *Food Chem.* 2016, 211, 185-197, doi:10.1016/j.foodchem.2016.04.142.
 9. Barros, R.G.C.; Andrade, J.K.S.; Denadai, M.; Nunes, M.L.; Narain, N. Evaluation of bioactive compounds potential and antioxidant activity in some Brazilian exotic fruit residues. *Food Res. Int.* 2017, 102, 84-92, doi:10.1016/j.foodres.2017.09.082.
 10. Soto-Castro, D.; Chavez, G.M.; León-Martínez, F.; Santiago-García, A.; Aragón-Lucero, I.; Antonio-Antonio, F. Spray drying microencapsulation of betalain rich extracts from *Escontria chiotilla* and *Stenocereus queretaroensis* fruits using cactus mucilage. *Food Chem.* 2017, 272, 715-722, doi:10.1016/j.foodchem.2018.08.069.
 11. Orsavová, J.; Hlaváčová, I.; Miček, J.; Snopek, L.; Mišurcová, L. Contribution of phenolic compounds, ascorbic acid and vitamin E to antioxidant activity of currant (*Ribes L.*) and gooseberry (*Ribes uvacrispa L.*) fruits. *Food Chem.* 2019, 284, 323-333, doi:10.1016/j.foodchem.2019.01.072.
 12. Oba, C.; Ota, M.; Nomura, K.; Fujiwara, H.; Takito, J.; Sato, Y.; Ohizumi, H.; Inomata, H. Extraction of nobiletin from *Citrus Unshiu* peels by supercritical fluid and its CRE-mediated transcriptional activity. *Phytomedicine* 2017, 27, 33-38, doi:10.1016/j.phymed.2017.01.014.
 13. Peixoto, C.M.; Dias, M.I.; Alves, M.J.; Calhelha, R.C.; Barros, L.; Pinho, S.P.; Ferreira, I.C.F.R. Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties. *Food Chem.* 2018, 253, 132-138, doi:10.1016/j.foodchem.2018.01.163.
 14. Martínez-Patiño, J.C.; Gullón, B.; Romero, I.; Ruiz, E.; Brnčić, M.; Žlabur, J.S.; Castro, E. Optimization of ultrasound-assisted extraction of biomass from olive trees using response surface methodology. *Ultrason. Sonochem.* 2019, 51, 487-495, doi:10.1016/j.ultsonch.2018.05.031.
 15. Yamashita, C.; Chung, M.M.S.; Santos, C.; Mayer, C.R.M.; Moraes, I.C.F.; Branco, I.G. Microencapsulation of an anthocyanin-rich blackberry (*Rubus spp.*) by-product

- extract by freeze-drying. LWT Food Sci. Technol. 2017, 84, 256-262, doi:10.1016/j.lwt.2017.05.063.
16. Lima, M.A.; Charalampopoulos, D.; Chatzifragkou, A. Optimisation and modelling of supercritical CO₂ extraction process of carotenoids from carrot peels. J. Supercrit. Fluids 2018, 133 Pt 1, 94-102, doi:10.1016/j.supflu.2017.09.028.
 17. Barros, H.D.F.Q.; Baseggio, A.M.; Angolini, C.F.F.; Pastore, G.M.; Cazarin, C.B.B.; Marostica-Junior, M.R. Influence of different types of acids and pH in the recovery of bioactive compounds in Jabuticaba peel (*Plinia cauliflora*). Food Res. Int. 2019, 124, 16-26, doi:10.1016/j.foodres.2019.01.010.
 18. Barbosa-Martín, E.; Chel-Guerrero, L.; González-Mondragón, E.; Betancur-Ancona, D. Chemical and technological properties of avocado (*Persea americana* Mill.) seed fibrous residues. Food Bioprod. Process. 2016, 100 Pt A, 457-463, doi:10.1016/j.fbp.2016.09.006.
 19. Nakthong, N.; Wongsagonsup, R.; Amornsakchai, T. Characteristics and potential utilizations of starch from pineapple stem waste. Ind. Crops Prod. 2017, 105, 74-82, doi:10.1016/j.indcrop.2017.04.048.
 20. Rojas, L.F.; Cortés, C.F.; Zapata, P.; Jiménez, C. Extraction and identification of endopeptidases in convection dried papaya and pineapple residues: A methodological approach for application to higher scale. Waste Manag. 2018, 78, 58-68, doi:10.1016/j.wasman.2018.05.020.
 21. Santos L, C.; Bitencourt, R.G.; Santos, P.; Rosa, P.T.V.; Martínez, J. Solubility of passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) seed oil in supercritical CO₂. Fluid Phase Equilib. 2019, 493, 174-180, doi:10.1016/j.fluid.2019.04.002.
 22. Viuda-Martos, M.; Ruiz-Navajas, Y.; Fernández-López, J.; Sendra, E.; Sayas-Barberá, E.; Pérez-Álvarez, J.A. Antioxidant properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) bagasses obtained as co-product in the juice extraction. Food Res. Int. 2011, 44, 1217-1223, doi:10.1016/j.foodres.2010.10.057.
 23. Mediani, A.; Abas, F.; Tan, C.; Khatib, A. Effects of different drying methods and storage time on free radical scavenging activity and total phenolic content of *Cosmos caudatus*. Antioxidants 2014, 3, 358-370, doi:10.3390/antiox3020358.
 24. Doymaz, I. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. Int. J. Food Sci. Technol. 2013, 48, 1909-1915, doi:10.1111/ijfs.12170.
 25. Tzempelikos, D.A.; Mitrakos, D.; Vouros, A.P.; Bardakas, A.V.; Filios, A.E.; Margaris, D.P. Numerical modelling of heat and mass transfer during convective

- drying of cylindrical quince slices. *J. Food Eng.* 2015, 156, 10-21, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017.
26. Aires, A.; Carvalho, R.; Saavedra, M.J. Valorization of solid wastes from chestnut industry processing: Extraction and optimization of polyphenols, tannins and ellagitannins and its potential for adhesives, cosmetic and pharmaceutical industry. *Waste Manag.* 2016, 48, 457-464, doi:10.1016/j.wasman.2015.11.019.
27. Allison, B.J.; Simmons, C.W. Valorization of tomato pomace by sequential lycopene extraction and anaerobic digestion. *Biomass Bioenergy* 2017, 105, 331-341, doi:10.1016/j.biombioe.2017.07.019.
28. Goldsmith, C.D.; Vuong, Q.V.; Stathopoulos, C.E.; Roach, P.D.; Scarlett, C.J. Ultrasound increases the aqueous extraction of phenolic compounds with high antioxidant activity from olive pomace. *LWT Food Sci. Technol.* 2018, 89, 284-290, doi:10.1016/j.lwt.2017.10.065.
29. Li, S.; Shah, N.P. Effects of various heat treatments on phenolic profiles and antioxidant activities of *Pleurotus eryngii* Extracts. *J. Food Sci.* 2013, 78, 1122-1129, doi:10.1111/1750-3841.12189.
30. Moure, A.; Conde, E.; Falqué, E.; Domínguez, E.; Parajó, J.C. Production of nutraceuticals from chestnut burs by hydrolytic treatment. *Food Res. Int.* 2014, 65 Pt C, 359-366, doi:10.1016/j.foodres.2014.08.052.
31. Abdennacer, B.; Karim, M.; Yassine, M.; Nesrine, R.; Mouna, D.; Mohamed, B. Determination of phytochemicals and antioxidant activity of methanol extracts obtained from the fruit and leaves of Tunisian *Lycium intricatum* Boiss. *Food Chem.* 2015, 174, 577-584, doi:10.1016/j.foodchem.2014.11.114.
32. García-Pérez, J.V.; Ortuño, C.; Puig, A.; Carcel, J.A.; Pérez-Munuera, I. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. *Food Bioprocess Technol.* 2012, 5, 2256-2265, doi:10.1007/s11947-011-0645-0.
33. Drosou, C.; Kyriakopoulou, K.; Bimpilas, A.; Tsimogiannis, D.; Krokida, M.A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts. *Ind. Crops Prod.* 2015, 75 Pt B, 141-149, doi:10.1016/j.indcrop.2015.05.063.
34. Zhang, Z.; Wang, X.; Li, L.; Wei, Q.; Liu, C.; Nie, M.; Li, D.; Xiao, Y.; Liu, C.; Xu, L.; et al. Evaluation of the impact of food matrix change on the in vitro

- bioaccessibility of carotenoids in pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices during two drying processes. *Food Funct.* 2017, 8, 4693-4702, doi:10.1039/C7FO01382E.
35. Ahmad-Qasem, M.H.; Ahmad-Qasem, B.H.; Barrajon-Catalan, E.; Micol, V.; Carcel, J.A.; Garcia-Perez, J.V. Drying and storage of olive leaf extracts. Influence on polyphenols stability. *Ind. Crops Prod.* 2016, 79, 232-239, doi:10.1016/j.indcrop.2015.11.006.
 36. Karxan, M.; Hamlin, A.S.; Scott, C.J.; Obied, H.K. Drying at high temperature for a short time maximizes the recovery of olive leaf biophenols. *Ind. Crops Prod.* 2015, 78, 29-38, doi:10.1016/j.indcrop.2015.10.031.
 37. Wei, L.; Shaoyun, W.; Shutao, L.; Jianwu, Z.; Lijing, K.; Pingfan, R. Increase in the free radical scavenging capability of bitter melon by a heat-drying process. *Food Funct.* 2013, 4, 1850-1855, doi:10.1039/C3FO60169B.
 38. Galaz, P.; Valdenegro, M.; Ramirez, C.; Nuñez, H.; Almonacid, S.; Simpson, R. Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. *J. Food Eng.* 2017, 208, 19-27, doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.04.002.
 39. Lobo, F.A.; Nascimento, M.A.; Domingues, J.R.; Falcão, D.Q.; Hernanz, D.; Heredia, F.J.; Araujo, K.G.L. Foam mat drying of Tommy Atkins mango: Effects of air temperature and concentrations of soy lecithin and carboxymethylcellulose on phenolic composition, mangiferin, and antioxidant capacity. *Food Chem.* 2017, 221, 258-266, doi:10.1016/j.foodchem.2016.10.080.
 40. Prawiranto, K.; Defraeye, T.; Derome, D.; Buhlmann, A.; Hartmann, S.; Verboven, P.; Nicolai, B.; Carmeliet, J. Impact of drying methods on the changes of fruit microstructure unveiled by X-ray micro-computed tomography. *RSC Adv.* 2019, 9, 10606-10624, doi:10.1039/C9RA00648F.
 41. Ahmad-Qasem, M.H.; Barrajon-Catalan, E.; Micol, V.; Mulet, A.; Garcia-Perez, J.V. Influence of freezing and dehydration of olive leaves (var. Serrana) on extract composition and antioxidant potential. *Food Res. Int.* 2013, 50, 189-196, doi:10.1016/j.foodres.2012.10.028.
 42. Wojdyło, A.; Figiel, A.; Lech, K.; Nowicka, P.; Oszmiański, J. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food Bioprocess Technol.* 2014, 7, 829-841, doi:10.1007/s11947-013-1130-8.

43. Ertekin, C.; Firat, M.Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017, 57, 701-717, doi:10.1080/10408398.2014.910493.
44. Pereira, E.M.; Silva, W.P.; Gomes, J.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Formiga, A.S.; Costa, F.B. Empirical models in the description of prickly pear shoot (Nopal) drying kinetics. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 2017, 21, 798-802, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p798-802.
45. Rahman, M.M.; Joardder, M.U.H.; Khan, M.I.H.; Pham, N.D.; Karim, M.A. Multi-Scale Model of Food Drying: Current Status and Challenges. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2018, 58, 858-876, doi:10.1080/10408398.2016.1227299.
46. Erbay, Z.; Icier, F. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2010, 50, 441-464, doi:10.1080/10408390802437063.
47. Kucuk, H.; Midilli, A.; Kilic, A.; Dincer, I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. *Dry. Technol.* 2014, 32, 757-773, doi:10.1080/07373937.2013.873047.
48. Santos D, C.; Leite, D.D.F.; Lisbôa, J.F.; Ferreira, J.P.L.; Santos, F.S.; Lima, T.L.B.; Figueiredo, R.M.F.; Costa, T.N. Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. *Braz. J. Food Technol.* 2019, 22, 1-12, doi:10.1590/1981-6723.03118.
49. Gomes, F.P.; Resende, O.; Sousa, E.P.; Oliveira, D.E.C.; Araújo-Neto, F.R. Drying kinetics of crushed mass of 'jambu': Effective diffusivity and activation energy. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 2018, 22, 499-505, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p499-505.
50. Mezziane, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. *Energy Convers. Manag.* 2011, 52, 1644-1649, doi:10.1016/j.enconman.2010.10.027.
51. Perussello, C.A.; Mariani, V.C.; Amarante, A.C.C. Numerical and experimental analysis of the heat and mass transfer during okara drying. *Appl. Therm. Eng.* 2012, 48, 325-331, doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.04.025.
52. Chimplee, S.; Klinkesorn, U. Thin-layer drying model of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) kernel and its application in fat extraction process. *Int. J. Food Eng.* 2015, 11, 243-253, doi:10.1515/ijfe-2014-0209.
53. Cruz, L.; Clemente, G.; Mulet, A.; Ahmad-Qasem, M.H.; Barrajon-Catalán, E.; García-Pérez, J.V. Air-borne ultrasonic application in the drying of grape skin:

- Kinetic and quality considerations. *J. Food Eng.* 2016, 168, 251-258, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.08.001.
54. Koukouch, A.; Idlimam, A.; Asbik, M.; Sarh, B.; Izrar, B.; Bostyn, S.; Bah, A.; Ansari, O.; Zegaoui, O.; Amine, A. Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Renew. Energy* 2017, 101, 565-574, doi:10.1016/j.renene.2016.09.006.
55. Guimarães, R.M.; Oliveira, D.E.C.; Resende, O.; Silva, J.S.; Rezende, T.A.M.; Egea, M.B. Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara'. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 2018, 22, 418-423, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423.
56. Cuevas, M.; Martínez-Cartas, M.L.; Pérez-Villarejo, L.; Hernández, L.; García-Martín, J.F.; Sánchez, S. Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. *Renew. Energy* 2019, 132, 911-920, doi:10.1016/j.renene.2018.08.053.
57. Ferreira, J.P.L.; Silva, W.P.; Queiroz, A.J.M.; Figueirêdo, R.M.F.; Gomes, J.P.; Melo, B.A.; Santos, D.C.; Lima, T.L.B.; Branco, R.R.C.; Hamawand, I.; et al. Description of cumbeba (*Tacinga inamoena*) waste drying at different temperatures using diffusion models. *Foods* 2020, 9, 1818, doi:10.3390/foods9121818.
58. Tello-Irelan, C.; Lemus-Mondaca, R.; Vega-Gálvez, A.; López, J.; Di Scala, K. Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. *LWT Food Sci. Technol.* 2011, 44, 2112-2118, doi:10.1016/j.lwt.2011.06.008.
59. Nakagawa, K.; Ritcharoen, W.; Sri-Uam, P.; Pavasant, P.; Adachi, S. Antioxidant properties of convective-air-dried *Spirulina maxima*: Evaluation of phycocyanin retention by a simple mathematical model of air-drying. *Food Bioprod. Process.* 2016, 100 Pt A, 292-302, doi:10.1016/j.fbp.2016.07.014.
60. Ramos, K.K.; Lessio, B.C.; Mecê, A.L.B.; Efraim, P. Mathematical modeling of uvaia byproduct drying and evaluation of quality parameters. *Food Sci. Biotechnol.* 2017, 26, 643-651, doi:10.1007/s10068-017-0078-2.
61. Alean, J.; Chejne, F.; Rojano, B. Degradation of polyphenols during the cocoa drying process. *J. Food Eng.* 2016, 189, 99-105, doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.05.026.

62. Azevêdo, J.C.S.; Fujita, A.; Oliveira, E.L.; Genovese, M.I.; Correia, R.T.P. Dried camu-camu (*Myrciaria dubia* H.B.K.McVaugh) industrial residue: A bioactive-rich Amazonian powder with functional attributes. *Food Res. Int.* 2014, 62, 934-940, doi:10.1016/j.foodres.2014.05.018.
63. Gümüşay, O.A.; Borazan, A.A.; Ercal, N.; Demirkol, O. Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. *Food Chem.* 2015, 173, 156-162, doi:10.1016/j.foodchem.2014.09.162.
64. Mphahlele, R.R.; Fawole, O.A.; Makunga, N.P.; Opara, U.L. Effect of drying on the bioactive compounds. antioxidant. antibacterial and antityrosinase activities of pomegranate peel. *BMC Complement Altern. Med.* 2016, 16, 1-12, doi:10.1186/s12906-016-1132-y.
65. Rahman, N.F.A.; Shamsudin, R.; Ismail, A.; Shah, N.N.A.K.; Varith, J. Effects of drying methods on total phenolic contents and antioxidant capacity of the pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peels. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2018, 50, 217-225, doi:10.1016/j.ifset.2018.01.009.
66. Sledz, M.; Wiktor, A.; Rybak, K.; Nowacka, M.; Witrowa-Rajchert, D. The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics. energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Appl. Acoust.* 2016, 103 Pt B, 148-156, doi:10.1016/j.apacoust.2015.05.006.
67. Tao, Y.; Wang, P.; Wang, Y.; Kadam, S.U.; Han, Y.; Wang, J.; Zhou, J. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrason. Sonochem.* 2016, 31, 310-318, doi:10.1016/j.ultsonch.2016.01.012.
68. Deng, L.-Z.; Mujumdar, A.S.; Zhang, Q.; Yang, X.-H.; Wang, J.; Zheng, Z.-A.; Gao, Z.-J.; Xiao, H.-W. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes-a comprehensive review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2019, 59, 1408-1432, doi:10.1080/10408398.2017.1409192.
69. Azeeza, L.; Adebisi, S.A.; Oyedeji, A.O.; Adetoro, R.O.; Tijani, O.K. Bioactive compounds contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 2019, 18, 120-126, doi:10.1016/j.jssas.2017.03.002.
70. Romdhane, N.G.; Bonazzi, C.; Kechaou, N.; Mihoubi, N.B. Effect of air-drying temperature on kinetics of quality attributes of lemon (*Citrus limon* cv. lunari) peels. *Dry. Technol.* 2015, 33, 1581-1589, doi:10.1080/07373937.2015.1012266.

71. Başlar, M.; Karasu, S.; Kiliçli, M.; Us, A.A.; Sağdıç, O. Degradation kinetics of bioactive compounds and antioxidant activity of pomegranate arils during the drying process. *Int. J. Food Eng.* 2014, 10, 839-848, doi:10.1515/ijfe-2014-0080.
72. Kao, T.-H.; Chen, C.-J.; Chen, B.H. Carotenoid composition in *Rhinacanthus nasutus* (L.) Kurz as determined by HPLC-MS and affected by freeze-drying and hot-air-drying. *Analyst* 2011, 136, 3194-3202, doi:0.1039/C1AN15090A.
73. Igual, M.; García-Martínez, E.; Martín-Esparza, M.E.; Martínez-Navarrete, N. Effect of processing on the drying kinetics and functional value of dried apricot. *Food Res. Int.* 2012, 47, 284-290, doi:10.1016/j.foodres.2011.07.019.
74. AOAC. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists; Method 934.01.; 16th Edition, Arlington, Virginia: USA; 1997.
75. Aktaş, M.; Şevik, S.; Amini, A.; Khanlari, A. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. *Sol. Energy* 2016, 137, 500-515, doi:10.1016/j.solener.2016.08.036.
76. Özdemira, M.B.; Aktaş, M.; Şevik, S.; Khanlari, A. Modeling of a convective-infrared kiwifruit drying process. *Int. J. Hydrog. Energy* 2017, 42, 18005-18013, doi:10.1016/j.ijhydene.2017.01.012.
77. Lewis, W.K. The rate of drying of solid materials. *J. Ind. Eng. Chem.* 1921, 13, 427-432, doi:10.1021/ie50137a021.
78. Page, G.E. Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin-Layers. Master's Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1949.
79. Henderson, S.M.; Pabis, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *J. Agric. Eng. Res.* 1961, 6, 169-174.
80. Sharaf-Eldeen, Y.I.; Blaisdell, J.L.; Hamdy, M.Y. A model for ear corn drying. *Trans. ASAE* 1980, 23, 1261-1271, doi:10.13031/2013.34757.
81. Thompson, T.L.; Peart, P.M.; Foster, G.H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. *Trans. ASAE* 1968, 11, 582-586.
82. Yagcioglu, A.; Degirmencioglu, A.; Cagatay, F. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy; Faculty of Agriculture, Cukurova University: Adana, Turkey, 1999, pp. 565-569.
83. Karathanos, V.T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *J. Food Eng.* 1999, 39, 337-344, doi:10.1016/S0260-8774(98)00132-0.

84. Henderson, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. ASAE* 1974, 17, 1167-1172, doi:10.13031/2013.37052.
85. Midilli, A.; Kucuk, H.; Yapar, Z. A new model for single-layer drying. *Dry. Technol.* 2002, 20, 1503-1513, doi:10.1081/DRT-120005864.
86. Luikov, A.V. *Analytical Heat Diffusion Theory*; Academic Press, Inc. Ltd.: London, UK, 1968.
87. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*, 1st ed.; Clarendon Press: Oxford, UK, 1992.
88. Bevington, P.R.; Robinson, D.K. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 2nd ed.; WCB/McGraw-Hill: Boston, MA, USA, 1992.
89. Taylor, J.R. *An Introduction to Error Analysis*, 2nd ed.; University Science Books: Sausalito, CA, USA, 1997.
90. Silva, W.P.; Precker, J.W.; Silva, C.M.D.P.S.; Gomes, J.P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. *J. Food Eng.* 2010, 98, 302-308, doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.12.029.
91. Guiné, R.P.F.; Henriques, F.; Barroca, M.J. Mass Transfer Coefficients for the Drying of Pumpkin (*Cucurbita moschata*) and Dried Product Quality. *Food Bioprocess Technol.* 2012, 5, 176-183, doi:10.1007/s11947-009-0275-y.
92. Pilatti, D.; Johann, G.; Palú, F.; Silva, E.A. Evaluation of a concentrated parameters mathematical model applied to drying of yerba mate leaves with variable mass transfer coefficient. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 105, 483-489, doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.02.139.
93. Waterhouse, A. Folin-ciocalteau micro method for total phenol in wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 2006, 3-5. Available online: <http://waterhouse.ucdavis.edu/faqs/folin-ciocalteau-micro-method-for-total-phenol-in-wine> (accessed on 18 September 2020).
94. Francis, F.J. Analysis of anthocyanins. In *Anthocyanins as Food Colors*; Markakis, P., Ed., Academic Press: New York, NY, USA; 1982; pp. 181-207.
95. Castellar, M.R.; Obón, J.M.; Alacid, M.; Fernández-López, J.A. Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. *J. Agric. Food. Chem.* 2003, 51, 2772-2776, doi:10.1021/jf021045h.
96. Çengel, Y.A.; Ghajar, A.J. *Transfer of Mass and Heat*, 4th ed.; AMGH Publisher LTDA: Porto Alegre, Brazil, 2012.

97. Chaux-Gutiérrez, A.M.; Santos, A.B.; Granda-Restrepo, D.M.; Mauro, M.A. Foam mat drying of mango: Effect of processing parameters on the drying kinetic and product quality. *Dry. Technol.* 2017, 35, 631-641, doi:10.1080/07373937.2016.1201486.
98. Ozcelik, M.; Ambros, S.; Heigl, A.; Dachmann, E.; Kulozik, U. Impact of hydrocolloid addition and microwave processing condition on drying behavior of foamed raspberry puree. *J. Food Eng.* 2019, 240, 83-91, doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.07.001.
99. Goneli, A.L.D.; Vieira, M.C.; Vilhasanti, H.C.B.; Gonçalves, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 2014, 44, 56-64, doi:10.1590/S1983-40632014000100005.
100. Corrêa, J.L.G.; Rasia, M.C.; Mulet, A.J.; Cárcel, A. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2017, 41, 284-291, doi:10.1016/j.ifset.2017.04.002.
101. Kandasamy, P.; Varadharaju, N.; Kalemullah, S. Foam-mat drying of papaya (*Carica Papaya* L.) using glycerol monostearate as foaming agent. *Food Sci. Qual. Manag.* 2012, 9, 17-27. Available online: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/FSQM/article/view/3241/3291> (accessed on 11 January 2021).
102. Asokapandian, S.; Venkatachalam, S.; Swamy, G.J.; Kuppusamy, K. Optimization of foaming properties and foam mat drying of muskmelon using soy protein. *J. Food Process Eng.* 2016, 39, 692-701, doi:10.1111/jfpe.12261.
103. Galdino, P.O.; Figueirêdo, R.M.F.; Queiroz, A.J.M.; Galdino, P.O. Drying kinetics of atemoya pulp. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 2016, 20, 672-677, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p672-677.
104. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Gama, F.J.A. Estimation of thermo-physical properties of products with cylindrical shape during drying: The coupling between mass and heat. *J. Food Eng.* 2014, 141, 65-73, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.05.010.
105. Ju, H.-Y.; Law, C.-L.; Fang, X.-M.; Xiao, H.-W.; Liu, Y.-H.; Gao, Z.-J. Drying kinetics and evolution of the sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying. *Dry. Technol.* 2015, 34, 1297-1306, doi:10.1080/07373937.2015.1105814.

106. Dehghannya, J.; Pourahmad, M.; Ghanbarzadeh, B.; Ghaffari, H. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. *J. Food Eng.* 2018, 238, 164-177, doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.06.014.
107. Dehghannya, J.; Pourahmad, M.; Ghanbarzadeh, B.; Ghaffari, H. Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. *Powder Technol.* 2018, 328, 470-484, doi:10.1016/j.powtec.2018.01.034.
108. Kumar, C.; Millar, G.J.; Karim, M.A. Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. *Dry. Technol.* 2014, 33, 227-237, doi:10.1080/07373937.2014.947512.
109. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Silva, D.D.P.S.; Neves, G.A.; Lima, A.G.B. Mass and heat transfer study in solids of revolution via numerical simulations using finite volume method and generalized coordinates for the Cauchy boundary condition. *Int. J. Heat Mass Transfer* 2010, 53, 1183-1194, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.028.
110. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Gomes, J.P. Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. *J. Food Eng.* 2013, 117, 417-424, doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.03.030.
111. Perussello, C.A.; Kumar, C.; Castilhos, F.; Karim, M.A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). *Appl. Therm. Eng.* 2014, 63, 23-32, doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.10.020.
112. Franco, T.S.; Perussello, C.A.; Ellendersen, L.S.N.; Masson, M.L. Foam mat drying of yacon juice: Experimental analysis and computer simulation. *J. Food Eng.* 2015, 158, 48-57, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.02.030.
113. Fantinel, P.; Borgman, O.; Holtzman, R.; Goehring, L. Drying in a microfluidic chip: Experiments and simulations. *Sci. Rep.* 2017, 7, 1-12, doi:10.1038/s41598-017-15718-6.
114. Singh, S.P.; Jairaj, K.S.; Srikant, K. Universal drying rate constant of seedless grapes: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16, 6295-6302, doi:10.1016/j.rser.2012.07.011.
115. Salahi, M.R.; Mohebbi, M.; Taghizadeh, M. Foam-mat drying of Cantaloupe (*Cucumis melo*): Optimization of foaming parameters and investigating drying

- characteristics. J. Food Process. Preserv. 2015, 39, 1798-1808, doi:10.1111/jfpp.12414.
116. Doymaz, I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. Heat Mass Transfer 2017, 53, 25-35, doi:10.1007/s00231-016-1791-8.
117. Das, S.; Banerjee, S.; Pal, J. Mathematical modeling of foam-mat dried pumpkin pulp. Int. J. Food Nutr. Sci. 2015, 4, 50-55. Available online: <http://www.ijfans.com/Volume%204%20Issue%203/8.%20IJFANS%20A0419-15.pdf> (accessed on 20 September 2020).
118. Franco, T.S.; Perussello, C.A.; Ellendersen, L.N.; Masson, M.L. Effect of process parameters on foam mat drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and thin-layer drying modeling of experimental data. J. Food Process Eng. 2017, 40, 1-10, doi:10.1111/jfpe.12264.
119. Sramek, M.; Schweiggert, R.N.; van Kampen, A.; Carle, R.; Kohlus, R. Preparation of High-Grade powders from tomato paste using a vacuum foam drying method. J. Food Sci. 2015, 80, 1755-1762, doi:10.1111/1750-3841.12965.
120. Prakotmak, P.; Soponronnarit, S.; Prachayawarakorn, S. Modelling of moisture diffusion in pores of banana foam mat using a 2-D stochastic pore network: Determination of moisture diffusion coefficient during adsorption process. J. Food Eng. 2010, 96, 119-126, doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.07.004.
121. Sangamithra, A.; Sivakumar, V.; Kannan, K.; John, S.G. Foam-mat drying of muskmelon. Int. J. Food Eng. 2015, 11, 127-137, doi:10.1515/ijfe-2014-0139.
122. Baptestini, F.M.; Corrêa, P.C.; Junqueira, M.S.; Ramos, A.M.; Vanegas, J.D.B.; Costa, C.F. Mathematical modeling of drying of soursop foam. Rev. Bras. Eng. Agric. 2015, 19, 1203-1208, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1203-1208.
123. Aral, S.; Beşe, A.V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. Food Chem. 2016, 210, 577-584, doi:10.1016/j.foodchem.2016.04.128.
124. Maciel, R.M.G.; Afonso, M.R.A.; Costa, J.M.C.; Severo, L.S.; Lima, N.D. Mathematical modeling of the foam-mat drying curves of guava pulp. Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient. 2017, 21, 721-725, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p721-725.

125. Abbasi, E.; Azizpour, M. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. *LWT Food Sci. Technol.* 2016, 68, 105-110, doi:10.1016/j.lwt.2015.12.004.
126. Toriki-Harchegani, M.; Ghasemi-Varnamkhasti, M.; Ghanbarian, D.; Sadeghi, M.; Tohidi, M. Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. *Heat Mass Transfer* 2016, 52, 281-289, doi:10.1007/s00231-015-1546-y.
127. Chen, Q.; Bi, J.; Wu, X.; Yi, J.; Zhou, L.; Zhou, Y. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation. *LWT Food Sci. Technol.* 2015, 64, 759-766, doi:10.1016/j.lwt.2015.06.071.
128. Sousa, E.P.; Figueirêdo, R.M.F.; Gomes, J.P.; Queiroz, A.J.M.; Castro, D.S.; Lemos, D.M. Mathematical modeling of pequi pulp drying and effective diffusivity determination. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 2017, 21, 493-498, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p493-498.
129. Borsini, A.A.; Llavata, B.; Umaña, M.; Cárcel, J.A. Artichoke by products as a source of antioxidant and fiber: How it can be affected by drying temperature. *Foods* 2021, 10, 459, doi:10.3390/foods10020459.
130. Madamba, P.S.; Driscoll, R.H.; Buckle, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. *J. Food Eng.* 1996, 29, 75-97, doi:10.1016/0260-8774(95)00062-3.
131. Milczarek, R.R.; Dai, A.A.; Otoni, C.G.; McHugh, T.H. Effect of shrinkage on isothermal drying behavior of 2-phase olive mill waste. *J. Food Eng.* 2011, 103, 434-441, doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.11.013.
132. Ruiz-López, I.I.; Ruiz-Espinosa, H.; Arellanes-Lozada, P.; Bárcenas-Pozos, M.E.; García-Alvarado, M.A. Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products. *J. Food Eng.* 2012, 108, 427-435, doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.08.025.
133. Younis, M.; Abdelkarim, D.; El-Abdein, A.Z. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi J. Biol. Sci.* 2018, 25, 332-338, doi:10.1016/j.sjbs.2017.06.011.
134. Thuwapanichayanan, R.; Prachayawarakorn, S.; Kunwisawa, J.; Soponronnarit, S. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT Food Sci. Technol.* 2011, 44, 1502-1510, doi:10.1016/j.lwt.2011.01.003.

135. Torrez-Irigoyen, R.M.; Goñi, S.M.; Giner, S.A. Drying-toasting kinetics of presoaked soybean. A Mathematical model considering variable diffusivity, shrinkage and coupled heat transfer. *J. Food Eng.* 2014, 142, 70-79, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.002.
136. Goula, A.M.; Thymiatis, K.; Kaderides, K. Valorization of grape pomace: Drying behavior and ultrasound extraction of phenolics. *Food Bioprod. Process.* 2016, 100 Pt A, 132-144, doi:10.1016/j.fbp.2016.06.016.
137. Zogza, N.P.; Maroulis, Z.B.; Marinou-Kouris, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Dry. Technol.* 1996, 14, 2225-2253, doi:10.1080/07373939608917205.
138. Saavedra, J.; Córdova, A.; Navarro, R.; Díaz-Calderón, P.; Fuentealba, C.; Astudillo, C.; Toledo, L.; Enrione, J.; Galvez, L. Industrial avocado waste: Functional compounds preservation by convective drying process. *J. Food Eng.* 2017, 198, 81-90, doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.11.018.
139. Nascimento, E.M.G.C.; Mulet, A.; Ascheri, J.L.R.; Carvalho, C.W.P.; Cárcel, J.A. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. *J. Food Eng.* 2016, 170, 108-118, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.09.015.
140. Chang, C.H.; Lin, H.Y.; Chang, C.Y.; Liu, Y.C. Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. *J. Food Eng.* 2006, 77, 478-485, doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.06.061.
141. Kaushal, M.; Sharma, P.C.; Sharma, R. Formulation and acceptability of foam mat dried seabuckthorn (*Hippophae salicifolia*) leather. *J. Food Sci. Technol.* 2013, 50, 78-85, doi:10.1007/s13197-011-0236-0.
142. Gokhale, S.V.; Lele, S.S. Betalain content and antioxidant activity of Beta vulgaris: Effect of hot air convective drying and storage. *J. Food Process. Preserv.* 2014, 38, 585-590, doi:10.1111/jfpp.12006.
143. Santos, F.S.; Figueirêdo, R.M.F.; Queiroz, A.J.M.; Santos, D.C. Drying kinetics and physical and chemical characterization of white-fleshed 'pitaya' peels. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 2017, 21, 872-877, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p872-877.
144. Mello, F.R.; Bernardo, C.; Dias, C.O.; Gonzaga, L.; Amante, E.R.; Fett, R.; Candido, L.M.B. Antioxidant properties, quantification and stability of betalains from pitaya

- (*Hylocereus undatus*) peel. *Ciência Rural* 2015, 45, 323-328, doi:10.1590/0103-8478cr20140548.
145. Khatabi, O.; Hanine, H.; Elothmani, D.; Hasib, A. Extraction and determination of polyphenols and betalain pigments in the Moroccan Prickly pear fruits (*Opuntia ficus indica*). *Arab. J. Chem.* 2016, 9 (Suppl. 1), S278-S281, doi:10.1016/j.arabjc.2011.04.001.
146. Bouzoubaâ, Z.; Essoukrati, Y.; Tahrouch, S.; Hatimi, A.; Gharby, S.; Harhar, H. Phytochemical study of prickly pear from southern Morocco. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 2016, 15, 155-161, doi:10.1016/j.jssas.2014.09.002.

ARTIGO II

Descrição da secagem do resíduo de cumbeba (*Tacinga inamoena*) em diferentes temperaturas usando modelos de difusão

Resumo: Uma abordagem para melhorar a produção agroindustrial sustentável de frutas é agregar valor aos resíduos gerados na extração da polpa. O processamento de frutos de cumbeba (*Tacinga inamoena*) gera uma quantidade significativa de resíduos, que é descartada sem posterior aplicação, mas pode ser uma fonte de compostos bioativos, entre outros nutrientes. Entre as formas mais simples e baratas de beneficiamento, a secagem convectiva aparece como primeira opção para o aproveitamento comercial de derivados de frutas, mas é essencial entender as propriedades de transferência de massa para a escolha apropriada das condições de secagem. Neste estudo, os resíduos de cumbeba foram secos em quatro temperaturas (50, 60, 70 e 80 °C). Três modelos de difusão foram ajustados aos dados experimentais das diferentes condições de secagem. Duas condições de contorno na superfície da amostra foram consideradas: condição de equilíbrio e condição convectiva. As simulações foram realizadas simultaneamente com a estimativa das difusividades efetivas de água (D_{ef}) e coeficientes convectivos de transferência de massa (h). A validação dos modelos foi verificada pela concordância entre a previsão teórica (simulação) e os resultados experimentais. Os resultados mostraram que para o melhor modelo as difusividades efetivas de água foram $2,9285 \times 10^{-9}$; $4,1695 \times 10^{-9}$; $8,1395 \times 10^{-9}$ e $1,2754 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, enquanto os coeficientes convectivos de transferência de massa foram $6,4362 \times 10^{-7}$; $8,7273 \times 10^{-7}$; $8,9445 \times 10^{-7}$ e $1,0912 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Os coeficientes de determinação foram maiores que 0,995 e os qui-quadrados foram menores que $2,2826 \times 10^{-2}$ para todas as simulações dos experimentos.

Palavras-chave: subproduto; cinética de secagem; solução analítica; difusividade efetiva de água; coeficiente convectivo de transferência de massa; energia de ativação

1. Introdução

Cumbeba (*Tacinga inamoena*) é uma espécie de cacto típica do nordeste do Brasil, que produz frutos que foram relatados como fonte de compostos bioativos, como compostos fenólicos, carotenóides, betalaínas e vitamina C [1-7]. O processamento da cumbeba gera um grande volume de resíduos, representando de 64,70% a 79,01% (m/m) da fruta processada [1,2,6], que é descartada sem outras aplicações. No entanto, o processamento de resíduos de frutas e vegetais para a produção de produtos de maior valor agregado, como compostos antioxidantes, corantes naturais, fibras dietéticas, amido, óleos comestíveis e enzimas [8-13], tem o potencial de se tornar um importante segmento do agronegócio que pode ser utilizado como alternativa para aumentar a rentabilidade na produção de frutas e, ao mesmo tempo, representar uma estratégia ecologicamente correta para minimizar a poluição ambiental.

Resíduo de cumbeba fresco é altamente perecível, portanto, a secagem é uma etapa crítica no processamento para aumentar sua vida útil para uso subsequente. Portanto, é importante estudar as características do processo de secagem para obter a quantidade desejada de resíduo com a menor demanda de energia e melhor qualidade possível. Nesse contexto, destaca-se a modelagem do processo de secagem. Os estudos de modelagem matemática do processo de secagem de resíduos geralmente utilizam uma abordagem empírica, baseada em modelos como os de Page, Thompson e Henderson, entre outros [14-18]. No entanto, a descrição da secagem com modelos empíricos sacrifica a investigação de questões importantes, particularmente aquelas relacionadas à influência das condições de secagem nas propriedades de transporte de massa (água), a compreensão da formação de resistências interna e no contorno do material e as consequências resultantes na dinâmica de remoção de água.

Essas limitações podem ser superadas com simulações usando modelos teóricos, que são baseados em princípios físicos e, portanto, permitem uma descrição mais realista do processo de secagem, incluindo informações gráficas e quantitativas sobre como a distribuição interna de água evolui [19-21]. Os modelos teóricos usados para estudar problemas de secagem são baseados principalmente na segunda lei de Fick, matematicamente representada pela equação de difusão [22-24]. Geralmente, para geometrias simples e sob o pressuposto de hipóteses simplificadoras, a equação de difusão é resolvida por métodos analíticos [22,23]. Apesar das restrições, a simulação com modelos analíticos é uma ferramenta útil para monitorar, controlar e otimizar o processo de secagem

e, adicionalmente, também é utilizada para gerar dados de validação para simulações numéricas [25].

Em vários estudos disponíveis na literatura sobre secagem de resíduos, a difusividade efetiva de água é determinada por regressão não linear, usando apenas o primeiro termo da série infinita da solução analítica da equação de difusão, resolvida para condições de contorno de equilíbrio [26-31]. No entanto, isso é particularmente problemático, porque a modelagem subjacente do processo de secagem usando esta abordagem pode resultar - para números de Biot de transferência de massa elevados característicos da condição de contorno de equilíbrio - em erros de truncamento significativos, especialmente nos instantes iniciais de secagem [32-34]. Assim, os modelos matemáticos que incorporam um número apropriado de termos da solução analítica da equação de difusão e/ou a condição de contorno convectiva para descrever o processo de secagem são mais bem-sucedidos [33,35-38].

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo simular o processo de secagem do resíduo de cumbeba, disposto em forma de placa plana e seco em temperaturas de operação de 50, 60, 70 e 80 °C, utilizando modelos de difusão com condições de contorno de equilíbrio e convectiva, bem como para determinar as propriedades de transporte de massa, como difusividade efetiva de água e coeficiente convectivo de transferência de massa e a energia de ativação durante o processo de secagem.

2. Materiais e métodos

2.1. Material

Frutos maduros de cumbeba (*Tacinga inamoena*), com casca amarela-alaranjada, foram colhidos no município de Afogados da Ingazeira (Pernambuco, Brasil - latitude 7° 45' 3" S, longitude 37° 38' 20" O, altitude 525 m). Os frutos sem defeitos e/ou injúrias foram lavados com detergente neutro e escova de cerdas macias para eliminação dos gloquídeos (espinhos) e higienizados por imersão em solução clorada (100 mg/kg) por 20 min; posteriormente, foram enxaguados com água potável para retirada do excesso da solução sanitizante e, em seguida, passados pelo extrator de polpa (Laboremus, Brasil), onde o subproduto (resíduo de cumbeba) foi coletado e utilizado como matéria-prima neste estudo. O resíduo da cumbeba, composto por frações da casca e vestígios de polpa e sementes, foi misturado para garantir uma melhor homogeneização e distribuição uniforme das frações, e posteriormente embalado em sacos de polietileno de baixa densidade com capacidade de 1,0

kg e imediatamente armazenado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ em freezer (Hesstar, HVF-301S, Brasil), onde permaneceu até o uso nas etapas experimentais. O teor de água do resíduo foi determinado gravimetricamente por meio de secagem em estufa a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressão $\leq 100\text{ mmHg}$ até atingir massa constante, de acordo com o método padrão 934.01 da Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [39].

2.2. Secagem convectiva do resíduo

Antes dos experimentos de secagem, a quantidade necessária de resíduo de cumbeba foi descongelada sob refrigeração ($\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h), deixada em temperatura ambiente ($\approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) por 2 h e submetida a trituração em um processador de alimentos (Philco, PMP1600P modelo, Brasil) por 5 min no modo 'alto' (nível de velocidade de rotação: 2). O resíduo triturado foi distribuído em bandejas circulares de alumínio ($81,1 \pm 0,1\text{ mm}$ de diâmetro) enquanto uma leve pressão foi aplicada para formar placas de espessura uniforme ($9,555 \pm 0,436\text{ mm}$) e conduzido à secagem em estufa com circulação forçada de ar (Fanem, modelo 320, Brasil) em quatro temperaturas ($50, 60, 70$ e $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) e velocidade do ar de $1,5\text{ m/s}$. As massas das amostras durante os experimentos foram medidas em intervalos de tempo variando de 5 min no início da secagem a 60 min no final do processo, em uma balança digital com precisão de $0,01\text{ g}$ (Marte, modelo AS5500C, Brasil). Os experimentos de secagem foram conduzidos até que as amostras atingissem a massa constante, ou seja, quando não havia variação da massa em três pesagens consecutivas, o que foi considerado como estado de equilíbrio. Após a secagem, foi obtida a matéria seca e o teor de água calculado a cada tempo de secagem de acordo com a AOAC [39]. Todos os experimentos de secagem foram realizados em três repetições.

2.3. Modelagem matemática da cinética de secagem

2.3.1. Equação de difusão ou equação governante

Para descrever um processo de secagem, a equação de difusão unidimensional para uma placa infinita pode ser escrita na forma da Equação (1) [22,23]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{ef}} \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (1)$$

onde X é o teor de água em base seca (b.s.), D_{ef} é a difusividade efetiva de água (m^2/s), t é o tempo (s) e x é a coordenada cartesiana da posição (m). A equação (1) foi resolvida para descrever a secagem do resíduo de cumbeba considerando as seguintes premissas: (1) ausência de contração do volume durante a secagem; (2) distribuição inicial de água uniforme; (3) a difusão é o único mecanismo de transporte de água no interior da amostra; (4) o resíduo é considerado homogêneo e isotrópico; (5) a difusividade efetiva de água não varia durante o processo; (6) o coeficiente convectivo de transferência de massa é constante durante a difusão; e (7) o processo é considerado isotérmico. Diferentes suposições na descrição do processo de secagem resultam em diferentes soluções da Equação (1); portanto, no presente estudo, três modelos foram utilizados para descrever a secagem do resíduo de cumbeba, e suas soluções são apresentadas a seguir.

2.3.1.1. Modelo 1: Solução analítica para a equação de difusão considerando condição de contorno do terceiro tipo ou convectiva

A condição de contorno do terceiro tipo é expressa considerando que o fluxo de massa difusivo interno no contorno do produto é igual ao fluxo convectivo externo nas proximidades deste contorno. Assim, para uma placa infinita, esta consideração resulta na Equação (2):

$$-D_{ef} \frac{\partial X(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L/2} = h[X(x,t)|_{x=\pm L/2} - X_{eq}], t > 0 \quad (2)$$

Na Equação (2), h é o coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s); $X(x, t)$ é o valor do teor de água na posição x no instante t ; X_{eq} é o teor de água de equilíbrio; e L é a espessura da placa infinita (m). Para as premissas mencionadas anteriormente (seção 2.3.1), com o valor inicial de água indicado por X_0 e a condição de contorno definida pela Equação (2), a solução analítica $X(x, t)$ da Equação (1) é dada pela Equação (3) [22,23]:

$$X(x, t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \times \cos\left(\mu_n \frac{x}{L/2}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} D_{ef} t\right) \quad (3)$$

onde a origem do eixo x está localizada no ponto central da placa infinita. Na Equação (3), o coeficiente A_n é dado pela Equação (4):

$$A_n = \frac{4 \sin \mu_n}{2\mu_n + \sin(2\mu_n)} \quad (4)$$

onde μ_n são as raízes da equação característica para uma placa infinita:

$$\cot \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi} \quad (5)$$

Na Equação (5), Bi é o número Biot de transferência de massa, dado pela Equação (6):

$$Bi = \frac{hL/2}{D_{ef}} \quad (6)$$

onde L é o comprimento característico (m). A expressão para determinar o teor de água médio, $\bar{X}(t)$, em um instante t , é na forma da Equação (7):

$$\bar{X}(t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} D_{ef} t\right) \quad (7)$$

onde o parâmetro B_n é dado pela Equação (8):

$$B_n = \frac{2Bi^2}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} \quad (8)$$

A Equação (5) é uma equação transcendental que pode ser resolvida para um número Biot de transferência de massa especificado. As primeiras 16 raízes da Equação (5) foram calculadas para 469 valores especificados de número de Biot de transferência de massa, de $Bi = 0$ (que corresponde a uma resistência infinita ao fluxo de água na superfície) a $Bi = 200$ (que praticamente corresponde a condição de contorno de equilíbrio). Na literatura é comum

encontrar a Equação (7) reescrita para expressar o valor do teor de água adimensional, sendo dada pela Equação (9):

$$RX(t) = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} D_{ef} t\right) \quad (9)$$

2.3.1.2. Modelo 2: Condição de contorno de primeiro tipo ou prescrita

Para a condição de contorno de primeiro tipo foi assumida uma condição de equilíbrio na superfície da amostra, de modo que o teor de água na superfície seja igual ao do equilíbrio. Dessa forma, para uma placa infinita, essa imposição resulta na Equação (10):

$$X|_{x=\pm L/2} = X_{eq}, t > 0 \quad (10)$$

Para uma placa infinita homogênea de espessura L , com distribuição do teor de água inicialmente uniforme ($t = 0, X = X_0, 0 \leq x \leq L$) e teor de água de equilíbrio X_{eq} , as soluções da Equação (1) também são dadas pelas Equações (3) e (7). No entanto, nesse caso em que o número Biot de transferência de massa tende ao infinito, característico da condição de contorno do primeiro tipo ($Bi \gg 0$), a Equação (5) é dada pela Equação (11) [40]:

$$\cot \mu_n = 0 \quad (11)$$

e, como consequência, μ_n é dado pela Equação (12):

$$\mu_n = \frac{\pi(2n - 1)}{2} \quad (12)$$

Com $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$. Assim, o coeficiente A_n (Equação (4)) é definido e o teor de água local a qualquer instante, $X(x, t)$, pode ser calculado pela Equação (3). Por outro lado, quando o número Biot de transferência de massa tende ao infinito B_n , calculado com a Equação (8), é redefinido de acordo com a Equação (13):

$$B_n = \frac{2}{\mu_n^2} \quad (13)$$

Com o coeficiente B_n calculado com a Equação (13) o teor médio de água no instante t , $\bar{X}(t)$, é dado na forma da Equação (14) [22]:

$$\bar{X}(t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2} \right] \quad (14)$$

onde $\bar{X}(t)$ é o teor de água médio (b.s.) no tempo t , X_{eq} é o teor de água para $t \gg 0$; X_0 é o teor de água em $t = 0$, D_{ef} é a difusividade efetiva de água (m^2/s), t é o tempo (s) e L é a espessura da placa infinita (m). Da Equação (14), o teor de água adimensional é calculado na forma da Equação (15):

$$RX(t) = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2} \right] \quad (15)$$

2.3.1.3. Modelo 3: Primeiro termo da série infinita

O modelo 3 é unidimensional, sem resistência externa, e assume que a forma geométrica da amostra é de uma placa infinita (área \gg espessura). A solução analítica unidimensional da Equação (1) para essas condições, em termos do teor de água adimensional, isto é, a Equação (15), é simplificada para apenas o primeiro termo da série, que segue a abordagem empregada em vários estudos sobre secagem de resíduos [26,27,30,31,41,42]. Nesse caso, a Equação (15) é reescrita da seguinte forma:

$$RX(t) = \frac{\bar{X}(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{L^2} \right) \quad (16)$$

2.4. Simulação computacional

Como mencionado anteriormente (seção 2.3.1), diferentes modelos são testados, e para determinar o melhor modelo para a descrição da secagem do resíduo de cumbeba o coeficiente de determinação (R^2) e o qui-quadrado (χ^2) das simulações são utilizados como critérios de qualidade do ajuste. Segundo Erbay & Icier (2010) e reforçado por Kucuk et al. (2014), o modelo com o maior valor de R^2 e o menor valor χ^2 é o melhor para descrever a cinética de secagem do produto.

As simulações foram realizadas, no caso da condição de contorno convectiva (modelo 1), no *software* Convective Adsorption-Desorption versão 3.2 (Universidade Federal de Campina Grande), e para a condição de contorno de equilíbrio (modelo 2), no *software* Prescribed Adsorption-Desorption versão 2.2 (Universidade Federal de Campina Grande), que são *softwares* que determinam os parâmetros de transporte, ou seja, os valores ótimos da difusividade efetiva de água (D_{ef}) e/ou do coeficiente convectivo de transferência de massa (h) usando um otimizador acoplado a solução analítica da equação de difusão, por meio de dados experimentais conhecidos. Basicamente, o otimizador varre todo o domínio dos valores do número Biot de transferência de massa (Bi) e/ou da difusividade efetiva de água (D_{ef}) e encontra o mínimo para a função objetivo $\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\overline{RX}_i^{\text{exp}} - \overline{RX}_i^{\text{ana}}(D_{ef}, Bi) \right]^2 \frac{1}{\sigma_i^2}$, que é o qui-quadrado (χ^2), definido conforme [45,46]. Como as incertezas associadas aos pontos experimentais (σ_i) não foram determinadas inicialmente e, portanto, eram desconhecidas, $\sigma_i = 1$ foi atribuído a todos os pontos experimentais e, dessa forma, o mesmo peso estatístico ($1/\sigma_i^2 = 1$) para todos eles. Os códigos-fonte foram compilados pelo Compaq Visual Fortran (CVF) 6.6.0 Professional Edition, usando a opção de programação QuickWin Application na plataforma Windows Vista. O critério de convergência estipulado para a determinação da difusividade efetiva de água para cada número de Biot de transferência de massa especificado foi 1×10^{-15} . Os *softwares* foram desenvolvidos pelo segundo autor deste trabalho e estão disponíveis para avaliação em <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convective.htm> e <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm> (Convective Adsorption-Desorption e Prescribed Adsorption-Desorption, respectivamente). Os gráficos que mostram a cinética de secagem, parametrizada em termos do teor de água adimensional, também foram obtidos por meio dos *softwares* empregados para determinar D_{ef} e/ou h e simular o processo. Para mais informações sobre o desenvolvimento dos *softwares* empregados neste trabalho, como

algoritmo de otimização dos parâmetros de transporte, h e/ou D_{ef} , os leitores devem consultar os trabalhos de [32,33] e suas referências.

Os *softwares* empregados na simulação dos modelos 1 e 2 (Convective Adsorption-Desorption e Prescribed Adsorption-Desorption, respectivamente) utilizam para a solução da equação de difusão, além das suposições apresentadas na seção 2.3, uma condição de simetria axial ($t > 0$; $0 \leq r \leq R$; $\partial X/\partial x|_{x=\pm L/2} = 0$). Como consequência, a origem do sistema de referência (eixo x) é considerada como estando localizada no ponto central da placa infinita ($x = L/2$). No entanto, isso não condiz com a realidade física da secagem do resíduo de cumbeba, pois a origem de seu sistema de referência (eixo x) está localizada na interface bandeja de alumínio-resíduo ($x = 0$). Assim, para contornar esse problema sem a necessidade de implementação de novos códigos-fonte, bastou dobrar o valor da espessura da amostra, pois com este artifício fez-se o ponto central da placa infinita, durante a execução da solução da equação de difusão pelos *softwares*, coincidir com a origem do eixo x do problema real.

Para o modelo 3, uma regressão não linear simples tornou possível determinar a difusividade efetiva de água (D_{ef}). A simulação foi realizada no *software* Statistica® versão 7.0 (Statsoft® Inc, Tulsa, EUA, 2007).

2.5. Equação do tipo Arrhenius

Para relacionar a difusividade efetiva de água (D_{ef}) e a temperatura (T) de secagem, uma equação do tipo Arrhenius, Equação (17), pode ser usada [34,47-49]:

$$D_{ef} = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right] \quad (17)$$

Na Equação (17), D_0 é o fator pré-exponencial (m^2/s), E_a é a energia de ativação (kJ/mol); R é a constante universal dos gases (0,008314 kJ/mol K) e T é a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}C$). Por outro lado, uma equação do tipo Arrhenius (Equação (18)) também pode ser usada para relacionar o coeficiente convectivo de transferência de massa (h) e a temperatura de secagem (T) [50-53]:

$$h = A \exp \left[-\frac{B}{R(T + 273,15)} \right] \quad (18)$$

onde A e B são parâmetros de ajuste.

3. Resultados e discussão

Inicialmente, o resultado obtido com o modelo 3 será apresentado. Em seguida, será apresentado o resultado obtido com o modelo 2 e, finalmente, o resultado obtido com o modelo 1. No início do processo ($t = 0$ e $RX = 1$), a quantidade de água do resíduo de cumbeba foi de $403,242 \pm 26,310\%$ b.s. ($80,079 \pm 1,039\%$ b.u.). Os valores de teor de água observados no equilíbrio ($t = t_{\infty}$ e $RX = 0$) nos ensaios realizados nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C foram de 6,601, 5,297, 10,431 10,095% b.s., com tempos de secagem de 1560, 1320, 1080 e 780 min, respectivamente.

3.1. Resultados obtidos com o modelo 3

Para o modelo 3, os resultados obtidos na simulação para todas as temperaturas são apresentados na Tabela 1. Os indicadores estatísticos ($R^2 \leq 0.9442$ e $\chi^2 \geq 2.2856$), que podem ser considerados ruins, indicam que o modelo 3 não se ajustou bem aos dados experimentais do processo de secagem do resíduo de cumbeba.

Tabela 1. Difusividade efetiva de água (D_{ef}) para o modelo 3

Temperatura (°C)	D_{ef} (m ² /s)	R^2	$\chi^2 \times 10^{-1}$
50	$1,1303 \times 10^{-9}$	0,9380	3,1172
60	$1,5615 \times 10^{-9}$	0,9442	2,5671
70	$1,9665 \times 10^{-10}$	0,9386	2,5427
80	$2,5440 \times 10^{-10}$	0,9324	2,2856

A Figura 1 mostra as curvas simuladas ajustadas ao conjunto de dados experimentais para as temperaturas do ar de secagem de 50, 60, 70 e 80 °C. Por exemplo, para a temperatura do ar de secagem de 50 °C (Figura 1a), em $t = 0$, o teor de água adimensional é de cerca de 0,81, ao invés de 1,0, como esperado, confirmando a baixa qualidade do ajuste do modelo 3 aos dados experimentais. Este resultado pode ser generalizado para as outras temperaturas investigadas (ver Figuras 1b a 1d), permitindo a conclusão de que o modelo 3 deve ser evitado para descrever a secagem do resíduo de cumbeba.

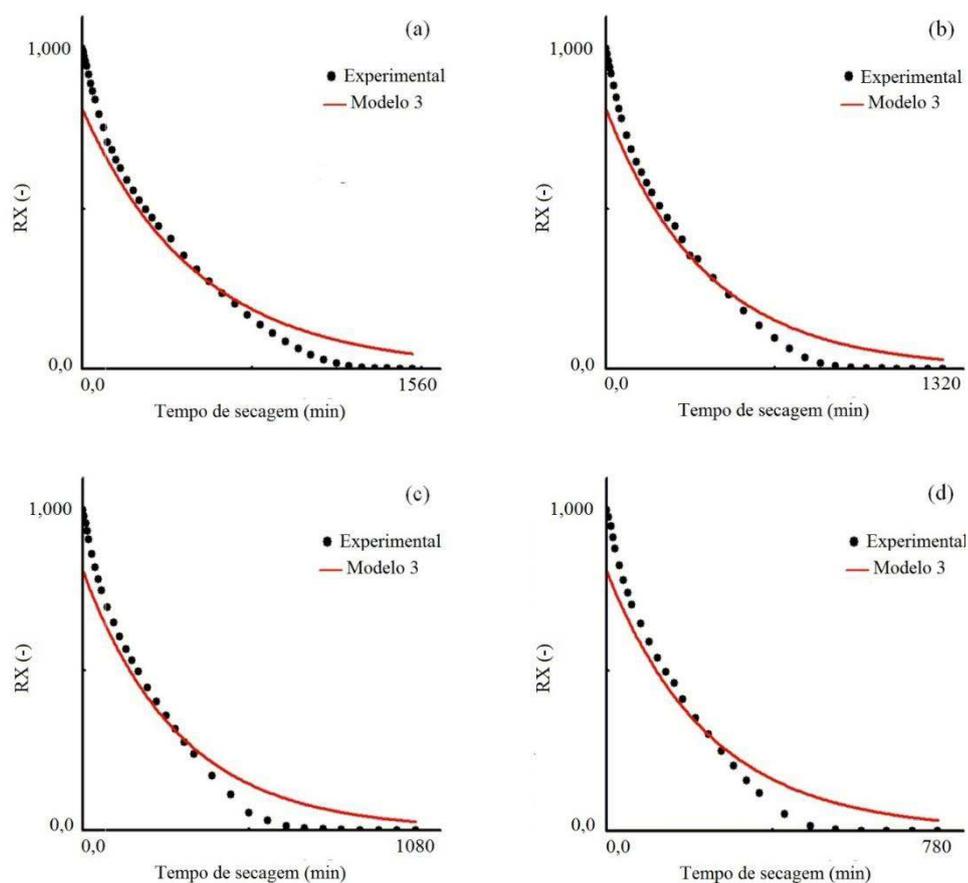


Figura 1. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo 3 nas temperaturas do ar de secagem de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C

De acordo com Silva et al. [34], para números de Biot de transferência de massa pequenos, alguns termos da série infinita que representa a solução da equação de difusão são suficientes para obter resultados com erros de truncamento que podem ser considerados insignificantes. No entanto, segundo os autores, quando o número de Biot aumenta, é necessário aumentar significativamente o número de termos da série infinita para evitar erros de truncamento maiores, especialmente nos instantes iniciais do processo de secagem. Nesse caso, no ajuste da solução analítica com apenas o primeiro termo da série infinita, como no caso do modelo 3, os primeiros pontos experimentais devem ser retirados para minimizar erros na determinação das propriedades de transporte [54,55] e, portanto, na descrição do processo de secagem do produto. Porém, neste trabalho, nenhum ponto foi retirado para descrever a cinética de secagem desse processo, mostrando o quão pobre é esse modelo, como pode ser visto na Figura 1. A título de exemplo, como mencionado anteriormente,

pode-se observar que, para $t = 0$, o teor de água adimensional por meio do modelo 3 é de cerca de 0,81, ao invés do valor esperado, que é 1,0.

3.2. Resultados obtidos com o modelo 2

Para a condição de contorno do primeiro tipo (modelo 2), cujos resultados da simulação são apresentados na Tabela 2, o número de Biot, dado por $Bi = (hL/2)/D_{ef}$, tende ao infinito, e o único parâmetro a ser determinado é a Difusividade efetiva de água (D_{ef}). Os valores de D_{ef} obtidos para a secagem convectiva do resíduo de cumbeba variaram de $1,1285 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (50 °C) a $2,5368 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (80 °C) (Tabela 2). Este comportamento, aumento de D_{ef} com o incremento da temperatura, é explicado pelo aumento da taxa de transferência de calor entre o resíduo e o ar de secagem, que ocorre devido ao aumento da temperatura [56], o que resulta em maior energia cinética das moléculas de água [57,58], aumento da pressão de vapor na amostra [59] e maior difusão para as camadas externas do resíduo. Resultados comparáveis sobre a mudança de D_{ef} com a temperatura têm sido observados na literatura por vários autores para diferentes tipos de resíduos, como sementes de uva [60], torta de restos de azeitona [61], okara (resíduo obtido durante o processo de fabricação de bebida de soja e tofu) [62], casca de maracujá [63] e resíduo de azeitona [64].

Tabela 2. Difusividade efetiva de água (D_{ef}) para o modelo 2

Temperatura (°C)	D_{ef} (m ² /s)	R ²	$\chi^2 \times 10^{-1}$
50	$1,1285 \times 10^{-9}$	0,9959	1,2094
60	$1,5603 \times 10^{-9}$	0,9954	1,0265
70	$1,9615 \times 10^{-9}$	0,9934	1,1395
80	$2,5368 \times 10^{-9}$	0,9921	1,0645

Depois de determinar o valor de D_{ef} , a cinética de secagem do resíduo de cumbeba pôde então ser descrita pelo modelo 2, como é mostrado na Figura 2. Os resultados obtidos com o modelo 2 (Tabela 2) podem ser considerados melhores que os obtidos com o modelo 3 (Tabela1), em razão dos maiores valores de R² e menores valores de χ^2 . Por outro lado, mesmo considerando 200 termos da série, os indicadores estatísticos mostram que o modelo 2 apresenta uma ligeira redução na qualidade de ajuste aos dados experimentais nas temperaturas de 70 e 80 °C, o que indica que o transporte de água não foi apenas controlado pela resistência interna, mas também pela influência da resistência externa a transferência

de massa. Esses resultados sugerem que a temperatura de secagem influencia a estrutura externa da amostra, modificando a condição de contorno mais adequada para a solução da equação de difusão (Equação (1)).

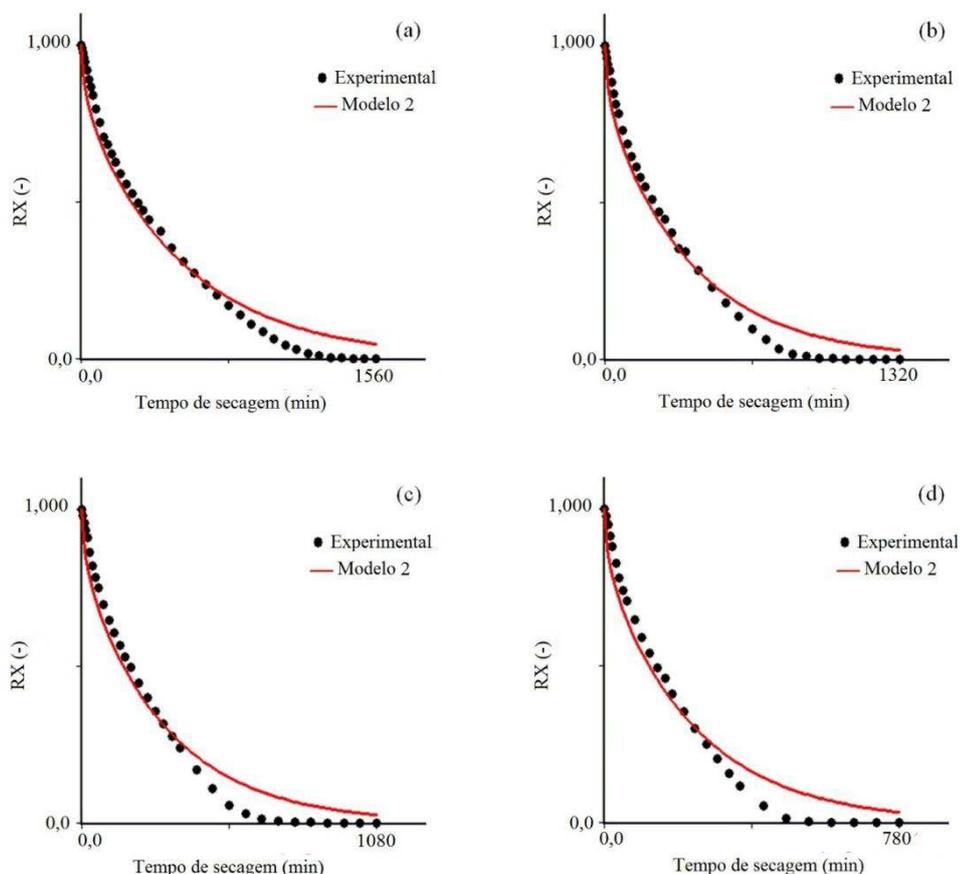


Figura 2. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo 2 nas temperaturas do ar de secagem de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C

Embora o aumento da temperatura de secagem acelere a retirada de água, a superfície do produto seca mais rápido que o centro e forma uma camada menos permeável, aumentando a resistência à transferência de calor para as amostras e estabelecendo barreira ao fluxo de massa [65,66]. Como consequência, a condição de contorno do primeiro tipo torna-se fisicamente inadequada para descrever a secagem em altas temperaturas e o modelo 2 deve também ser evitado para descrever a secagem do resíduo de cumbeba. Essa observação fica ainda mais evidente na análise da Figura 2. Nesta figura, as curvas simuladas, nos instantes iniciais, ficam abaixo dos pontos experimentais e, após certo tempo, ficam sempre acima desses pontos até o final do processo, o que, segundo Silva et al. [67], é um comportamento típico de um fenômeno de difusão em que uma certa resistência ocorre

na superfície (limite) do produto, mas não foi considerado na solução da equação diferencial governante, como no caso do modelo 2. Este resultado está de acordo com as observações de estudos anteriores [35,36,51,55,68].

3.1.1. Resultados obtidos com o modelo 1

Para a condição de contorno de terceiro tipo (modelo 1), os resultados obtidos para todas as temperaturas são apresentados na Tabela 3. Os indicadores estatísticos obtidos podem ser considerados razoáveis ($R^2 \geq 0,9951$ e $\chi^2 \leq 1,9738 \times 10^{-2}$) para todas as temperaturas investigadas. Uma comparação entre os modelos, para o processo de secagem a 80 °C, indica que o qui-quadrado para o modelo 1 é 5,39 vezes menor que este indicador estatístico para o modelo 2. Comparando os modelos 1 e 3, esse fator é 11,58. Esses fatores comparativos servem para indicar que o modelo 1 representa um ajuste melhor do que os modelos 2 e 3.

Tabela 3. Difusividade efetiva de água (D_{ef}), coeficiente convectivo de transferência de massa (h) e número de Biot (Bi) para o modelo 1

Temp. (°C)	D_{ef} (m ² /s)	h (m/s)	Bi (-)	R^2	$\chi^2 \times 10^{-2}$
50	$2,9285 \times 10^{-9}$	$6,4362 \times 10^{-7}$	2,10	0,9962	2,2826
60	$4,1695 \times 10^{-9}$	$8,7273 \times 10^{-7}$	2,00	0,9962	2,1171
70	$8,1395 \times 10^{-9}$	$8,9445 \times 10^{-7}$	1,05	0,9957	2,1434
80	$1,2754 \times 10^{-8}$	$1,0912 \times 10^{-6}$	0,82	0,9951	1,9738

Além disso, os coeficientes de determinação obtidos para o modelo 1 são superiores aos valores obtidos pelos outros modelos (ver Tabela 3). O modelo 2 apresenta coeficientes de determinação próximos aos valores correspondentes do modelo 1, mas sempre ligeiramente inferiores. Como o domínio deste indicador estatístico está entre 0,0 e 1,0, cada algarismo significativo de R^2 é importante e o modelo 1 realmente representa melhor os dados experimentais. Essa afirmação é ainda mais evidente quando se olha para os qui-quadrados: o modelo 2 tem qui-quadrados com valores que são cerca de cinco vezes o valor correspondente ao modelo 1. Assim, entre os três modelos analisados no presente estudo, o modelo 1 é o mais indicado para descrever a secagem convectiva do resíduo de cumbeba. Este resultado está de acordo com observações de estudos anteriores sobre a secagem de

diferentes tipos de produtos biológicos, onde o modelo que considera as condições de contorno de terceiro tipo também descreve os dados experimentais melhor [34-38].

Como os parâmetros do processo (D_{ef} , Bi e h) foram determinados via técnica de otimização, a Equação (9) foi utilizada nas simulações da cinética de secagem dos conjuntos de dados experimentais, para as temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, como mostrado na Figura 3.

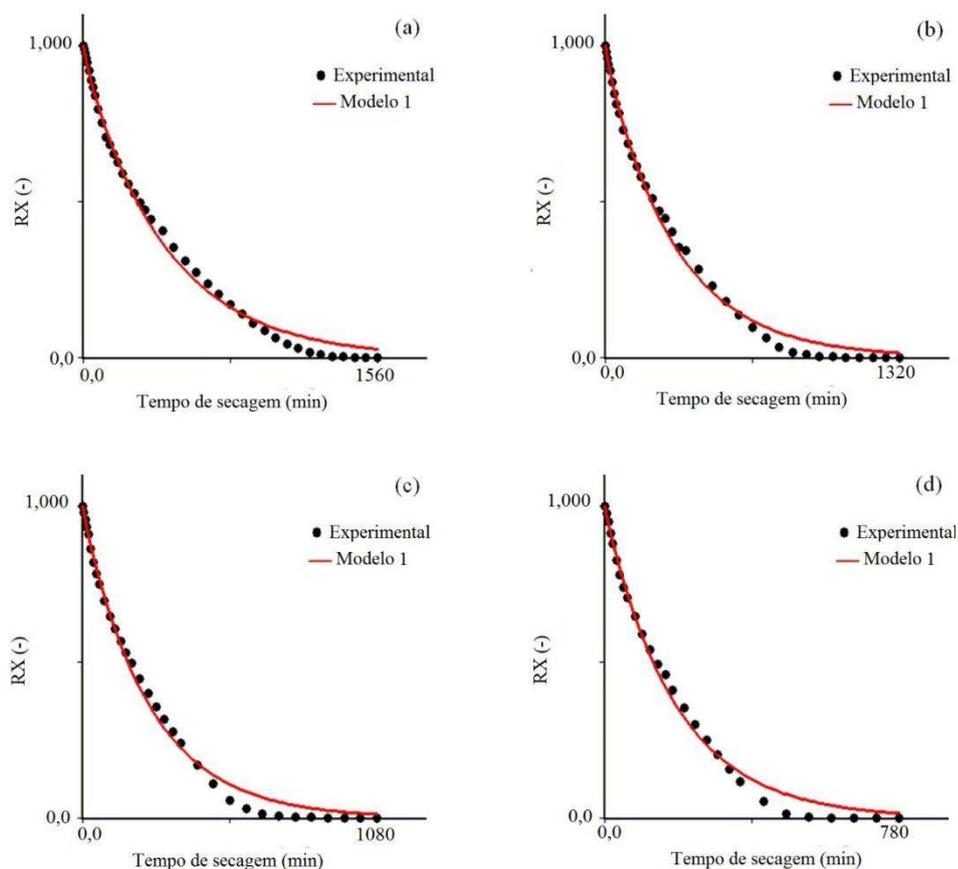


Figura 3. Comparação do teor de água adimensional experimental e previsto usando o modelo 1 nas temperaturas do ar de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C

Uma análise das Figuras 1, 2 e 3 revela a mesma conclusão, que o modelo 1 resulta em um melhor ajuste aos dados experimentais do que os modelos 2 e 3. Os baixos valores de número de Biot de transferência de massa obtidos através do modelo 1, em diferentes condições experimentais, apresentados na Tabela 3, confirmam a existência de resistência ao fluxo de massa (água) na superfície do produto, principalmente na secagem a 70 e 80 °C. Contudo, mesmo o modelo 1, que considera que existe alguma resistência externa ao

transporte de água e apresentando indicadores estatísticos razoáveis, não consegue captar com precisão a natureza física do processo de secagem dos resíduos de cumbeba.

Na Figura 3a-d é possível observar que, no início do processo, a curva simulada se ajusta bem aos pontos experimentais, mas ao final continua acima desses pontos. Uma explicação para este resultado é que o modelo analisado (modelo 1) possui condições restritivas ao não considerar que durante a secagem as propriedades de calor e transporte de massa - parâmetros termofísicos - podem variar devido às heterogeneidades e comportamento anisotrópico dos materiais [69,70], mudanças estruturais associadas principalmente ao encolhimento [71,72] e também à temperatura e/ou composição do material [25,48,51,73-75].

Além disso, a combinação de temperatura e umidade durante a secagem influencia a transição vítrea do material. Com o tempo de secagem, o teor de água diminui e a temperatura de transição vítrea (T_g) aumenta. Com isso, o material pode passar do estado elástico para o vítreo, com a difusão diminuindo até atingir o teor de água de equilíbrio [76]. Portanto, para uma descrição rigorosa do processo de secagem, estes fatores devem ser considerados. Nesse caso, fica claro que a solução analítica da equação de difusão apresentada neste artigo não é um modelo plenamente apropriado para descrever o comportamento real da secagem do resíduo de cumbeba.

Os resultados obtidos no presente estudo podem servir como valores iniciais para processos de otimização das propriedades de transporte de massa (D_{ef} e h) que envolvem uma descrição mais realista da física do processo de secagem do resíduo de cumbeba, como aqueles que utilizam modelos obtidos a partir de soluções numéricas da equação de difusão que consideram a influência das deformações por contração e/ou variação da composição (teor de água) nos fenômenos de transporte [77-80].

Uma vez calculados os parâmetros da cinética de secagem (Tabela 3), a Equação 9 permite determinar o teor de água adimensional (RX) em qualquer ponto da amostra, em um instante previamente estipulado. Os dados experimentais e as curvas de ajuste da cinética de secagem para todos os ensaios são mostrados na Figura 4.

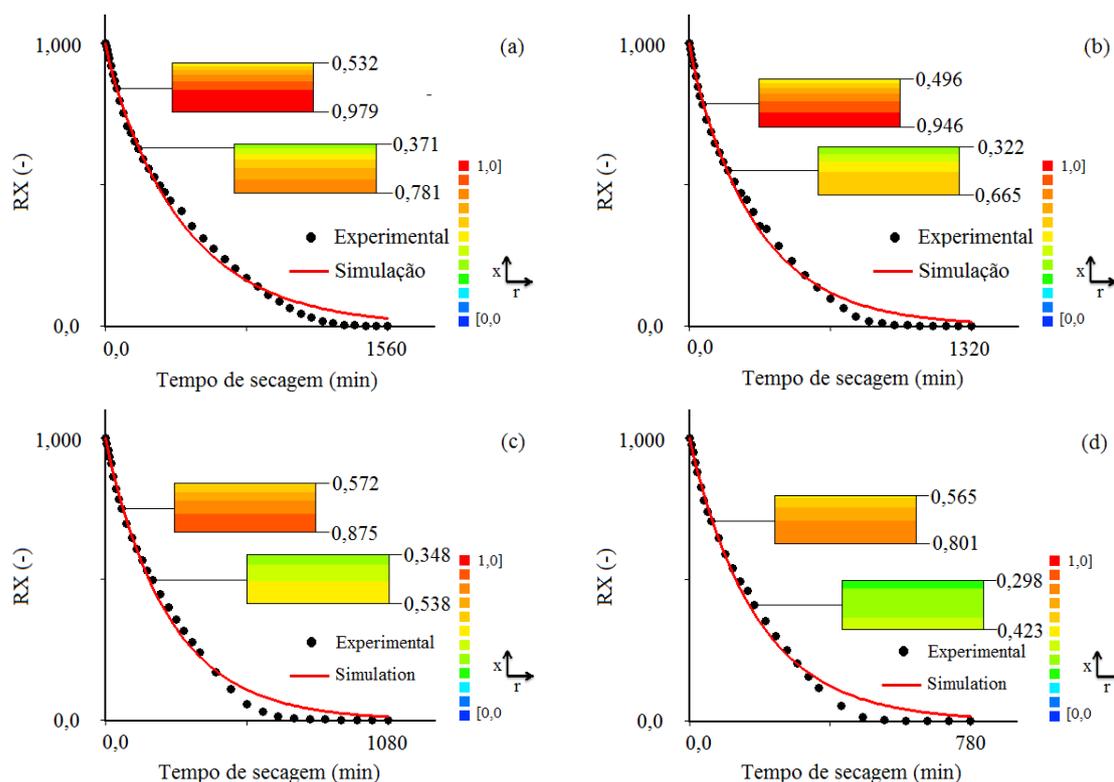


Figura 4. Cinética de secagem do resíduo de cumbeba nas temperaturas de secagem de (a) 50 °C, (b) 60 °C, (c) 70 °C e (d) 80 °C destacando as distribuições de teor de água adimensional (RX) em $t = 60$ min e $t = 180$ min. Os retângulos não estão em escala

Na Figura 4 também é mostrado a distribuição do teor de água adimensional nos instantes $t = 60$ min e $t = 180$ min para todas as temperaturas de secagem. Os retângulos que mostram a distribuição de água, em função de RX, na seção transversal da placa infinita, que representa a amostra de resíduo de cumbeba, apresentam os valores máximo e mínimo do teor de água adimensional na base ($x = 0$) e na superfície da amostra ($x = L$), respectivamente. Em $t = 780$ min, os valores médios de teor de água adimensional obtidos por simulação foram de 0,16, 0,08, 0,04 e 0,02, para temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C, respectivamente, refletindo o aumento que a elevação da temperatura impõe à velocidade do processo de retirada de água, reduzindo o tempo de secagem, como observado em pesquisas anteriores [26,42,81]. Isto significa que a difusividade efetiva de água é menor na secagem em baixas temperaturas, como previsto pelo modelo 1 (ver Tabela 3), o que promove a formação de um elevado gradiente de água na amostra, tornando o processo de secagem menos homogêneo e mais longo (longo tempo de secagem).

Além disso, na Figura 4 é possível observar que o conteúdo de água local diminuiu continuamente com o tempo de secagem. Como exemplo, para a temperatura de 50 °C, em $t = 60$ min, os valores máximo e mínimo do teor de água adimensional foram 0,979 (base) e

0,532 (superfície) e, no instante $t = 180$ min, esses valores foram de 0,781 (base) e 0,371 (superfície) (ver Figura 4a).

As distribuições de teor de água adimensional para a temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ em seis instantes são mostradas na Fig. 5, onde é possível notar que o fluxo de água viajou da interface bandeja de alumínio-resíduo ($x = 0$) para a superfície da amostra ($x = L$) exposta ao ar. Com o passar do tempo (Figura 5a a 5f), as camadas externas do resíduo tornam-se cada vez mais insaturadas de umidade, com redução progressiva do gradiente de teor de água, sendo possível observar uma frente de secagem movendo-se da superfície para a base do produto. Resultados semelhantes foram encontrados em estudos anteriores, onde a presença de umidade residual no interior da amostra também foi observada experimentalmente e / ou por simulação, enquanto sua superfície estava praticamente seca [79,82-86]. Da Figura 5 pode-se concluir que, mesmo com limitações, o modelo de difusão apresentado neste estudo (modelo 1) é uma ferramenta útil para prever a distribuição de água do resíduo de cumbeba em um determinado momento, possibilitando o estudo de diversos cenários sem a necessidade de novos experimentos.

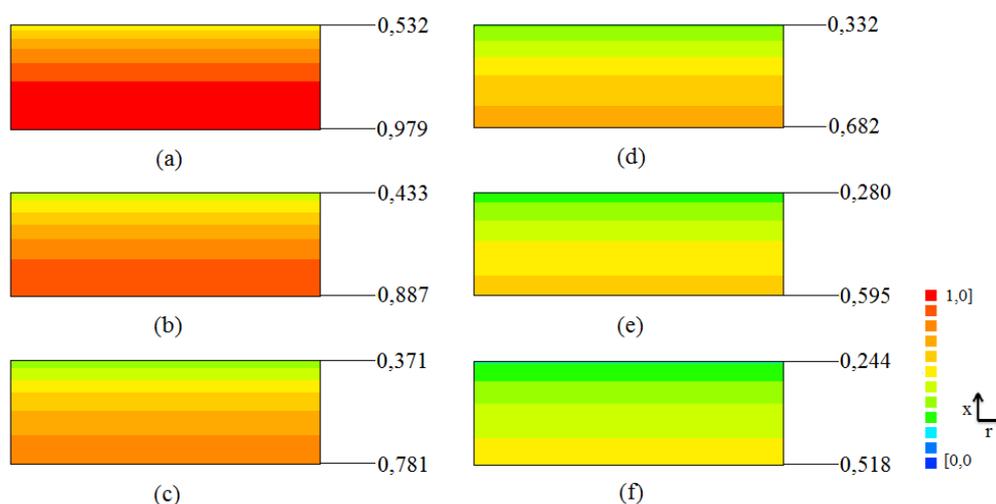


Figura 5. Distribuições de teor de água adimensional (RX) para a secagem em $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a: (a) $t = 60$ min; (b) 120 min; (c) 180 min; (d) 240 min; (e) 300 min e (f) 360 min. Os retângulos foram desenhados sem escala

Os valores de D_{ef} e h obtidos nas simulações (Tabela 3) em função da temperatura de secagem, bem como as curvas para esses parâmetros obtidas a partir das equações do tipo Arrhenius (Equações (17) e (18)), são apresentadas nas Figuras 6 e 7.

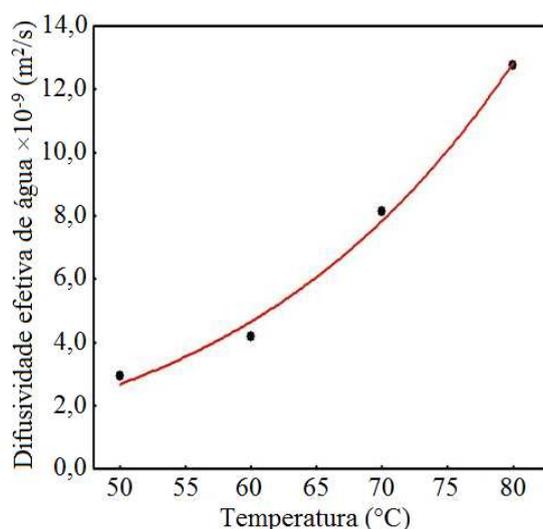


Figura 6. Difusividade efetiva de água (D_{ef}) versus temperatura do ar de secagem

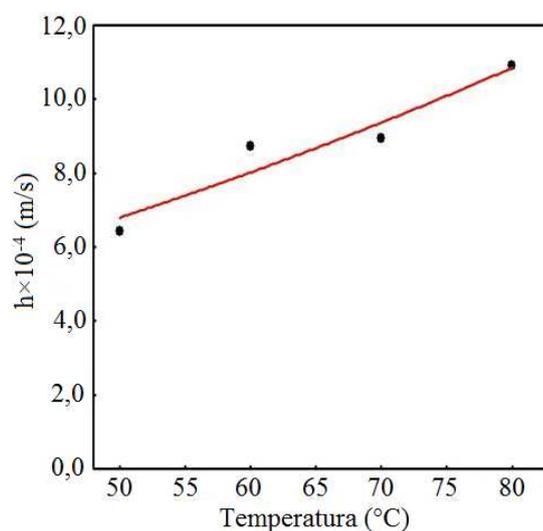


Figura 7. Coeficiente convectivo de transferência de massa (h) versus temperatura do ar de secagem

É possível observar uma tendência de aumento de D_{ef} e h com o incremento na temperatura (Figuras 6 e 7, respectivamente), o que é explicado pelo aumento da taxa de transferência de calor entre o resíduo e o ar de secagem, causado pelo aumento da temperatura, o que resulta em maior agitação das moléculas de água [57,58], facilitando a difusão da água para a superfície da amostra e a remoção pelo ar de secagem. Os valores de D_{ef} obtidos neste estudo ($2,9285 \times 10^{-9}$ - $1,2754 \times 10^{-8}$ m²/s) são semelhantes aos valores das difusividades relatadas para frutas e legumes, de 10^{-11} - 10^{-9} m²/s [87].

Com o ajuste da Equação (17) aos pares (T , D_{ef}), apresentados na Tabela 3, foram obtidos os seguintes resultados: $D_0 = 1,0238 \times 10^{-1}$ m²/s e $E_a/R = 5618,416$ K, com coeficiente de determinação de 0,993. Assim, a Equação (17) pode ser reescrita como:

$$D_{ef} = 1,0238 \times 10^{-1} \exp \left[-\frac{5618,416}{(T + 273,15)} \right] \quad (19)$$

O ajuste da Equação (18) aos pares (T, h) apresentados na Tabela 3 leva aos seguintes resultados: $A = 1,671 \times 10^{-4}$ m/s e $B = E_a/R = 1778,955$ K, com coeficiente de determinação de 0,919, considerado adequado dada a grande variabilidade natural da matéria-prima. Assim, a Equação (18) pode ser reescrita como:

$$h = 1,671 \times 10^{-4} \exp \left[-\frac{1778,955}{(T + 273,15)} \right] \quad (20)$$

As energias de ativação da difusão e convecção de água do resíduo de cumbeba foram calculadas usando as Equações (19) e (20), respectivamente. Os valores de energia de ativação (E_a) nas diferentes condições de secagem foram 46,71 kJ/mol e 14,790 kJ/mol para difusão e convecção, respectivamente. Esses valores estão dentro da faixa de energia de ativação relatada para diferentes materiais biológicos, entre 12,7 e 110 kJ/mol [88].

4. Conclusões

A comparação entre as simulações e os dados experimentais permitiram concluir que o modelo 1, que considera o fluxo de massa difusivo interno igual ao fluxo convectivo externo na vizinhança das amostras (condição de contorno de terceiro tipo) para a solução da difusão equação, é o mais adequado para descrever o processo de secagem do resíduo de cumbeba. Nas temperaturas de secagem mais baixas (50-60 °C), uma condição de equilíbrio na superfície da amostra (condição de contorno do primeiro tipo) para a solução da equação de difusão descreve satisfatoriamente a cinética de secagem do resíduo de cumbeba (R^2 entre 0,995-0,996), porém mesmo nesses casos, o modelo 1 apresenta os melhores indicadores estatísticos ($R^2 > 0,996$). Quanto mais alta a temperatura, maior a difusividade da água e menor o tempo necessário para o resíduo atingir o teor de umidade de equilíbrio, conforme previsto pelo modelo 1. Embora o modelo 1 seja útil para estimar a evolução temporal e local da distribuição da água durante a secagem de resíduo de cumbeba, para melhor entendimento do processo, em experimentos futuros, heterogeneidades e anisotropias das propriedades de transporte (D_{ef} e h), bem como efeitos de contração, precisam ser

considerados. Para tanto, a simulação com modelos numéricos pode fornecer uma visão mais completa dos fenômenos de transporte do processo de secagem do resíduo de cumbeba. Nas condições estudadas, foi possível obter equações empíricas para os parâmetros do processo (D_{ef} e h) em função da temperatura do ar de secagem, o que permite prever o comportamento da cinética a uma temperatura escolhida na faixa de 50 a 80 °C, sem a necessidade de realização de novos ensaios experimentais.

Referências

1. Souza, A.C.M.; Gamarra-Rojas, G.; Andrade, S.A.C.; Guerra, N.B. Physical chemical and chemical characteristics of 'quipá' (*Tacinga inamoena*. Cactaceae). *Revista Brasileira de Fruticultura* 2007, 29, 292-295, doi:10.1590/S0100-29452007000200020.
2. Silva, S.M.; Brito-Primo, D.M.; Torres, L.B.V.; Martins, L.P.; Lima, A.B.; Silva, F.V.G. Features of postharvest physiology and quality of cactaceae fruits from Brazilian Northeast. *Acta Hort.* 2009, 811, 113-122, doi:10.17660/ActaHortic.2009.811.11.
3. Nascimento, V.T.; Moura, N.P.; Vasconcelos, M.A.S.; Maciel, M.I.S.; Albuquerque, U.P. Chemical characterization of native wild plants of dry seasonal forests of the semi-arid region of northeastern Brazil. *Food Res. Int.* 2011, 44, 2112-2119, doi:10.1016/j.foodres.2010.12.024.
4. Dantas, R.L.; Shunemann, A.P.; Silva, S.M.; Melo, R.S.; Silva, R.S.; Souza, F.A.R.M. Quality and descriptive terminology of *Tacinga inamoena* (k. Schum.) fruits. *Acta Hort.* 2015, 58, 143-149, doi:10.17660/ActaHortic.2015.1067.19.
5. Dantas, R.L.; Silva, S.M.; Santos, L.F.; Dantas, A.L.; Lima, R.P.; Soares, L.G. Betalains and antioxidant activity in fruits of cactaceae from Brazilian semiarid. *Acta Hort.* 2015, 58, 151-157, doi:10.17660/ActaHortic.2015.1067.20.
6. Formiga, A.S.; Costa, F.B.; Silva, M.S.; Pereira, E.M.; Brasil, Y.L. Physical and chemical aspects of fruit Quipá (*Tacinga inamoena*). *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* 2016, 11, 25-29, doi:10.18378/rvads.v11i5.4559.
7. Lima, R. K. B.; Sarmiento, J. D. A.; Neta, T. R.; Morais, P. L. D.; Silva, G. G.; Sarmiento, D. H. A. Caracterização dos frutos do pelo (*Tacinga inamoena*) e do mandacaru (*Cereus jamacaru*). In *Coleção Agroecologia e Meio Ambiente no Semiárido: Produção Orgânica no Semiárido*, Editora da Universidade Federal Rural

- do Semi-Árido (EDUFERSA), Brazil, 2016, Volume 3, pp. 335-344, ISBN: 978-85-5757-063-4.
8. Martínez, R.; Torres, P.; Meneses, M.A.; Figueroa, J.G.; Pérez-Álvarez, J.A.; Viudamartos, M. Chemical, technological and in vitro antioxidant properties of mango, guava, pineapple and passion fruit dietary fibre concentrate. *Food Chem.* 2012, 135, 1520-1526, doi:10.1016/j.foodchem.2012.05.057.
 9. Chaurasiya, R.S.; Hebbar, U.U. Extraction of bromelain from pineapple core and purification by RME and precipitation methods. *Sep. Purif. Technol.* 2013, 111, 90-97, doi:10.1016/j.seppur.2013.03.029.
 10. Arlene, A.A.; Prima, K.A.; Utama, L.; Anggraini, S.A. The preliminary study of the dye extraction from the avocado seed using ultrasonic assisted extraction. *Procedia Chem.* 2015, 16, 334-340, doi:10.1016/j.proche.2015.12.061.
 11. Chel-Guerrero, L.; Barbosa-Martína, E.; Martínez-Antonio, A.; González-Mondragón, E.; Betancur-Ancona, D. Some physicochemical and rheological properties of starch isolated from avocado seeds. *Int. J. Biol. Macromol.* 2016, 86, 302-308, doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.01.052.
 12. Oba, C.; Ota, M.; Nomura, k.; Fujiwara, H.; Takito, J.; Sato, Y.; Ohizumi, H.; Inomata, H. Extraction of nobiletin from Citrus Unshiu peels by supercritical fluid and its CRE-mediated transcriptional activity. *Phytomedicine* 2017, 27, 33-38, doi:10.1016/j.phymed.2017.01.014.
 13. Ndayishimiye, J.; Lim, D.J.; Chun, B.S. Antioxidant and antimicrobial activity of oils obtained from a mixture of citrus by-products using a modified supercritical carbon dioxide. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2018, 57, 339-348, doi:10.1016/j.jiec.2017.08.041.
 14. Chimplee, S.; Klinkesorn, U. Thin-layer drying model of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) kernel and its application in fat extraction process. *Int. J. Food Eng.* 2015, 11, 243-253, doi:10.1515/ijfe-2014-0209.
 15. Avhad, M.R.; Marchett, J.M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. *Ind. Crops Prod.* 2016, 91, 76-87, doi:10.1016/j.indcrop.2016.06.035.
 16. Santos, F.S.; Figueirêdo, R.M.F.; Queiroz, A.J.M.; Santos, D.C. Drying kinetics and physical and chemical characterization of white-fleshed 'pitaya' peels. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 2017, 21, 872-877, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p872-877.

17. Guimarães, R.M.; Oliveira, D.E.C.; Resende, O.; Silva, J.S.; Rezende, T.A.M.; Egea, M.B. Thermodynamic properties and drying kinetics of 'okara'. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 2018, 22, 418-423, doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p418-423.
18. Nogueira, G.D.R.; Silva, P.B., Duarte, C.R.; Barrozo, M.A.S. Analysis of a hybrid packed bed dryer assisted by infrared radiation for processing acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) residue. *Food Bioprod. Processo.* 2019, 114, 235-244, doi:10.1016/j.fbp.2019.01.007.
19. Kumar, C.; Millar, G.J.; Karim, M.A. Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. *Drying Technol.* 2014, 33, 227-237, doi:10.1080/07373937.2014.947512.
20. Perussello, C.A.; Kumar, C.; Castilhos, F.; Karim, M.A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). *Appl. Therm. Eng.* 2014, 63, 23-32, doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.10.020.
21. Ju, H-Y.; Law, C-L.; Fang, X-M.; Xiao, H-W.; Liu, Y-H.; Gao, Z-J. Drying kinetics and evolution of the sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying. *Drying Technol.* 2015, 34, 1297-1306, doi:10.1080/07373937.2015.1105814.
22. Luikov, A.V. *Analytical Heat Diffusion Theory*. 1rd ed.; Publisher: Academic Press, Inc. Ltd, London, 1968.
23. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*. 1rd ed.; Publisher: Clarendon Press, Oxford, UK, 1992.
24. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. *Transport Phenomena*, 3rd ed.; Publisher: John Wiley and Sons, Inc., New York, 2001.
25. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Silva, D.D.P.S.; Neves, G.A.; Lima, A.G.B. Mass and heat transfer study in solids of revolution via numerical simulations using finite volume method and generalized coordinates for the Cauchy boundary condition. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2010, 53, 1183-1194, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.028.
26. Henríquez, C.; Córdova, A.; Almonacid, S.; Saavedra, J. Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. *J. Food Eng.* 2014, 143, 146-153, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.037.

27. Kara, C.; Doymaz. I. Thin layer drying kinetics of by-products from pomegranate juice processing. *J. Food Process. Preserv.* 2015, 39, 480-487, doi:10.1111/jfpp.12253.
28. Goula, A.M.; Thymiatis, K.; Kaderides, K. Valorization of grape pomace: Drying behavior and ultrasound extraction of phenolics. *Food Bioprod. Process.* 2016, 100, Part A, 132-144, doi:10.1016/j.fbp.2016.06.016.
29. Saavedra, J.; Córdova, A.; Navarro, R.; Díaz-Calderón, P.; Fuentealba, C.; Astudillo, C.; Toledo, L.; Enrione, J.; Galvez, L. Industrial avocado waste: Functional compounds preservation by convective drying process. *J. Food Eng.* 2017, 198, 81-90, doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.11.018.
30. Wilkins, R.; Brusey, J.; Gaura, E. Modelling uncontrolled solar drying of mango waste. *J. Food Eng.* 2018, 237, 44-51, doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.05.012.
31. Badaoui, O.; Hanini. S.; Djebli. A.; Haddad. B.; Benhamou. A. Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models. *Renewable Energy* 2019, 133, 144-155, doi:10.1016/j.renene.2018.10.020.
32. Silva, W.P., Precker, W.J.; Silva, C.M.D.P.S.; Silva, D.D.P.S. Determination of the effective via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. *J. Food Eng.* 2009, 95 298-304, doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.05.008.
33. Silva, W.P.; Precker, J.W.; Silva, C.M.D.P.S.; Gomes, J.P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. *J. Food Eng.* 2010, 98, 302-308, doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.12.029.
34. Silva, W.P.; Farias, V.S.O.; Neves, G.A.; Lima, A.G.B. Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions. *Heat and Mass Transfer* 2012, 48, 809-821, doi:10.1007/s00231-011-0931-4.
35. Silva, W.P, Silva, C.M.D.P.S.; Precker, J.W.; Gomes, J.P.; Nascimento, P.L.; Silva, L.D. Diffusion models for the description of seedless grape drying using analytical and numerical solutions. *Agricultural Sciences* 2012, 3, 545-556, doi:10.4236/as.2012.34065.
36. Lima, A.G.B.; Delgado, J.M.P.Q.; Oliveira, V.A.B.; Melo, J.C.S.; Silva C.J. Porous Materials Drying Model Based on the Thermodynamics of Irreversible Processes: Background and Application. In *Transport Phenomena and Drying of Solids and*

- Particulate Materials. Advanced Structured Materials, 2nd ed.; Delgado, J.M. P. Q., Lima A. G. B., Eds.; Publisher: Springer, Cham, United States, 2014, Volume 48, pp. 1-23. doi:10.1007/978-3-319-04054-7_1.
37. Johann, G.; Menezes, M.L.; Pereira, N.C.; Silva, E.A. Comparing models to Neumann and Dirichlet conditions in grape seed drying. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 93, 865-871, doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.10.005.
 38. Nascimento, E.M.G.C.; Mulet, A.; Ascheri, J.L.R.; Carvalho, C.W.P.; Cárcel, J.A. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. *J. Food Eng.* 2016, 170, 108-118, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.09.015.
 39. AOAC. Official methods of analysis. Association of official analytical chemists. Virginia. USA: Method 934.01. 1997.
 40. Silva W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Lins, M.A.; Costa, W.S. Optimal removal of experimental points to determine apparent thermal diffusivity of canned products. *International J. Food Eng.* 2014, 10, 223-231, 2014, doi:10.1515/ijfe-2013-0016.
 41. Zhao, P.; Zhong, L.; Zhu, R.; Zhao, Y.; Luo, Z.; Yang, X. Drying characteristics and kinetics of Shengli lignite using different drying methods. *Energy Convers. Manage.* 2016, 120, 330-337, doi:10.1016/j.enconman.2016.04.105.
 42. Galaz, P.; Valdenegro, M.; Ramírez, C.; Nuñez, H.; Almonacid, S.; Simpson, R. Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. *J. Food Eng.* 2017, 208, 19-27, doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.04.002.
 43. Erbay, Z.; Icier, F. A review of thin layer drying of foods: Theory. modeling. and experimental results. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2010, 50, 441-464, doi:10.1080/10408390802437063.
 44. Kucuk, H.; Midilli, A.; Kilic, A.; Dincer, I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. *Drying Technol.* 2014, 32, 757-773, doi:10.1080/07373937.2013.873047.
 45. Bevington, P. R.; Robinson, D.K. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, 2nd ed.; Publisher: WCB/McGraw-Hill, Boston, 1992.
 46. Taylor, J.R. An Introduction to Error Analysis, 2nd ed.; Publisher: Sausalito, California, University Science Books, 1997.
 47. Guiné, R.P.F.; Henriques, F.; Barroca, M.J. Mass transfer coefficients for the drying of pumpkin (*Cucurbita moschata*) and dried product quality. *Food Bioprocess Technol.* 2012, 5, 176-183, doi:10.1007/s11947-009-0275-y.

48. Tzempelikos, D.A.; Mitrakos, D.; Vouros, A.P.; Bardakas, A. V.; Filios, A.E.; Margaris, D.P. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *J. Food Eng.* 2015, 156, 10-21, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017.
49. Pilatti, D.; Johann, G.; Palú, F.; Silva, E.A. Evaluation of a concentrated parameters mathematical model applied to drying of yerba mate leaves with variable mass transfer coefficient. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 105, 483-489, doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.02.139.
50. Silva, W.P.; Amaral, D.S.; Duarte, M.E.M.; Mata, M.E.R.M.C.; Silva, C.M.D.P.S.; Pinheiro, R.M.M.; Pessoa, T. Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (*Cocos nucifera* L.) pieces: A three-dimensional approach. *J. Food Eng.* 2013, 115, 121-131, doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.10.007.
51. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Gomes, J.P. Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. *J. Food Eng.* 2013, 117, 417-424, doi: 10,1016/j.jfoodeng,2013,03,030.
52. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Silva, L.D.; Farias, V.S.O. Drying of clay slabs during the falling rate period: optimization and simulation of the process using diffusion models. *Journal of Materials Science Research* 2013, 2, 1-13, doi:10.5539/jmsr.v2n2p1.
53. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Lins, M.A.A.; Gomes, J.P. Osmotic dehydration of pineapple (*Ananas comosus*) pieces in cubical shape described by diffusion models. *LWT Food Sci. Technol.* 2014, 55, 1-8, doi:10.1016/j.lwt.2013.08.016.
54. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Aires, J.E.F.; Silva-Junior, A.F. Osmotic dehydration and convective drying of coconut slices: Experimental determination and description using one-dimensional diffusion model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 2014, 13, 162-168, doi:10.1016/j.jssas.2013.05.002.
55. Pinheiro, R.M.M.; Silva, W.P.; Miranda, D.S.A.; Silva, C.M.D.P.S.; Pessoa, T.; Medeiros, M.S. Description of Osmotic Dehydration of Melon Cubes using a Three-dimensional Diffusion Model: An Algorithm to Determine the Effective Diffusivity. *International J. Food Eng.* 2017, 13, 1-13, doi: 10.1515/ijfe-2017-0241.
56. Çengel, Y.A.; Ghajar, A.J. *Transfer of mass and heat*, 4rd ed.; Publisher: AMGH publisher LTDA, Porto Alegre, 2012.
57. Chen, Q.; Bi, J.; Wu, X.; Yi, J.; Zhou, L.; Zhou, Y. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and

- medium-wave infrared radiation. *LWT Food Sci. Technol.* 2015, 64, 759-766, doi:10.1016/j.lwt.2015.06.071.
58. Abbasi, E.; Azizpour, M. Evaluation of Physicochemical Properties of Foam Mat Dried Sour Cherry Powder. *LWT Food Sci. Technol.* 2016, 68, 105-110, doi:10.1016/j.lwt.2015.12.004.
59. Ozcelik, M.; Ambros, S.; Heigl, A.; Dachmann, E.; Kulozik, U. Impact of hydrocolloid addition and microwave processing condition on drying behavior of foamed raspberry puree. *J. Food Eng.* 2019, 240, 83-91, doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.07.001.
60. Roberts, J.S.; Kidd, D.R.; Padilla, O.Z. Drying kinetics of grape seeds. *J. Food Eng.* 2008, 89, 460-465, doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030.
61. Vega-Gálvez, A.; Miranda, M.; Díaz, L.P.; Lopez, L.; Rodriguez, K.; Di Scala, K. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 7265-7270, doi:10.1016/j.biortech.2010.04.040.
62. Perussello, C.A.; Mariani, V.C.; Amarante, A.C.C. Numerical and experimental analysis of the heat and mass transfer during okara drying. *Appl. Therm. Eng.* 2012, 48, 325-331, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.025.
63. Bezerra, C.V.; Silva, L.H.M.; Corrêa, D.F.; Rodrigues, A.M.C. A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel. *Int. J. Heat Mass Transfer* 2015, 85, 750-755, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.02.027.
64. Koukouch, A.; Idlimam, A.; Asbik, M.; Sarh, B.; Izrar, B.; Bostyn, S.; Bah, A.; Ansari, O.; Zegaoui, O.; Amine, A. Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Renewable Energy* 2017, 101, 565-574, doi:10.1016/j.renene.2016.09.006.
65. Munhoz, C.L.; Sanjinez-Argandoña, E.J.; Campagnolli, R.; Macedo, M.L.R. Drying of the kernel and fresh and osmotically dehydrated bocaiuva pulps. *Acta Scientiarum Technology* 2014, 36, 165-170, doi:10.4025/actascitechnol.v36i1.16843.
66. Corrêa, J.L. G.; Rasia, M.C.; Mulet, A.J.; Cárcel, A. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 2017, 41, 284-291, doi:10.1016/j.ifset.2017.04.002.

67. Silva, W.P.; Nunes, J.S.; Gomes, J.P.; Araújo, A.C.; Silva, C.M.D.P.S. Description of jambolan (*Syzygium cumini* (L.) anthocyanin extraction kinetics at different stirring frequencies of the medium using diffusion models. *Heat and Mass Transfer* 2018, 54, 3275-3285, doi:10.1007/s00231-018-2349-8.
68. Silva, W.P.; Rodrigues, A.F.; Silva, C.M.D.P.S.; Castro, D.S.; Gomes, J.P. Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. *J. Food Eng.* 2015, 166, 230-236, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.06.018.
69. Fernando, W.J.N.; Low, H.C.; Ahmad, A.L. Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. *J. Food Eng.* 2011, 102, 310-316, doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.09.004.
70. Silva, W.P.; Silva, C.M.D.P.S.; Farias, V.S.O.; Lima, A.G.B. Effect of the geometry on the description of the water absorption by composite materials using diffusion models. *Materialwiss. Werkstofftech.* 2011, 42, 747-752, doi:10.1002/mawe.201100800.
71. Milczarek, R.R.; Dai, A.A.; Otoni, C.G.; McHugh, T.H. Effect of shrinkage on isothermal drying behavior of 2-phase olive mill waste. *J. Food Eng.* 2011, 103, 434-441, doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.11.013.
72. Ruiz-López, I.I.; Ruiz-Espinosa, H.; Arellanes-Lozada, P.; Bárcenas-Pozos, M.E.; García-Alvarado, M. A. Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products. *J. Food Eng.* 2012, 108, 427-435, doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.08.025.
73. Zhan, J.; Gu, J.; Cai, Y.J. Analysis of moisture diffusivity of larch timber during convective drying condition by using Crank's method and Dincer's method. *J. For. Res.* 2007, 18 199-203, doi:10.1007/s11676-007-0040-x.
74. Thuwapanichayanan, R.; Prachayawarakorn, S.; Kunwisawa, J.; Soponronnarit, S. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT Food Sci. Technol.* 2011, 44, 1502-1510, doi:10.1016/j.lwt.2011.01.003.
75. Torres-Irigoyen, R.M.; Goñi, S.M.; Giner, S.A. Drying-toasting kinetics of presoaked soybean. A Mathematical model considering variable diffusivity, shrinkage and coupled heat transfer. *J. Food Eng.* 2014, 142, 70-79, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.002.

76. Nicoleti, J.F.; Silveira, V., Jr.; Telis-Romero, J.; Telis, V. Influence of Drying Conditions on Ascorbic Acid during Convective Drying of Whole Persimmons. *Dry. Technol.* 2007, 25, 891-899. doi:10.1080/07373930701370365.
77. Silva, W.P.; Precker, J.W.; Silva, D.D.P.S. Silva, C.D.P.S.; Lima, A.G.B. Numerical simulation of diffusive processes in solids of revolution via the finite volume method and generalized coordinates. *Int. J. Heat Mass Transfer* 2009, 52, 4976-4985, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.05.008.
78. Silva, W.P.; Hamawand, I.; Silva, C.M.D.P.S. A liquid diffusion model to describe drying of whole bananas using boundary-fitted coordinates. *J. Food Eng.* 2014, 137, 32-38, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.03.029.
79. Aprajeeta, J.; Gopirajah, R.; Anandharamakrishnan, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *J. Food Eng.* 2015, 144, 119-128, doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.08.004.
80. Llave, T.; Takemori, K.; Fukuoka, M.; Takemori, T.; Tomita, T.; Sakai, N. Mathematical modeling of shrinkage deformation in eggplant undergoing simultaneous heat and mass transfer during convection oven roasting. *J. Food Eng.* 2016, 178, 124-136, doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.01.013.
81. Ahmad-Qasem, M. H.; Barrajon-Catalan, E.; Micol, V.; Cárcel, J. A.; Garcia-Perez, J. V. Influence of air temperature on drying kinetics and antioxidant potential of olive pomace. *J. Food Eng.* 2013, 119, 516-524, doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.06.027.
82. Aregawi, W.; Defraeye, T.; Saneinejad, S.; Vontobel, P.; Lehmann, E.; Carmeliet, J.; Verboven, P.; Derome, D.; Nicolai, B. Understanding forced convective drying of apple tissue: Combining neutron radiography and numerical modeling. *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* 2014, 24, 97-105, doi:10.1016/j.ifset.2013.10.014.
83. Franco, T. S.; Perussello, C. A.; Ellendersen, L. S. N.; Masson, M. L. Foam mat drying of yacon juice: Experimental analysis and computer simulation. *J. Food Eng.* 2015, 158, 48-57, doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.02.030.
84. Defraeye, T.; Nicolai, B.; Mannes, M.; Aregawi, W.; Verboven, P.; Derome, D. Probing inside fruit slices during convective drying by quantitative neutron imaging. *J. Food Eng.* 2016, 178, 198-202, doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.01.023.
85. Dehghannya, J.; Pourahmad, M.; Ghanbarzadeh, B.; Ghaffari, H. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. *J. Food Eng.* 2018, 238, 164-177, doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.06.014.

86. Dehghannya, J.; Pourahmad, M.; Ghanbarzadeh, B.; Ghaffari, H. Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. *Int. J. Therm. Sci.* 2019, 135, 30-43, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023.
87. Madamba. P.S.; Driscoll. R.H.; Buckle. K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. *J. Food Eng.* 1996, 2, 75-97, doi:10.1016/0260-8774(95)00062-3.
88. Zogza, N.P.; Maroulis, Z.B.; Marinos-Kouris, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technol.* 1996, 14, 2225-2253, doi:10.1080/07373939608917205.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características de secagem convectiva e qualidade do resíduo de cumbeba submetido a diferentes pré-tratamentos foram investigadas. O resíduo integral seco a 50 °C levou menos tempo para atingir o equilíbrio higroscópico, enquanto nas temperaturas de secagem de 60, 70 e 80 °C, o resíduo na forma de espuma apresentou os menores tempos. Em todas as condições estudadas, a secagem ocorreu principalmente no período de taxa decrescente. Os resultados da modelagem matemática mostraram que o modelo de Midilli foi o melhor na descrição do processo de secagem do resíduo de cumbeba. A temperatura mais alta, independentemente do pré-tratamento, resultou em maiores valores de difusividade efetiva de água (D_{ef}) e do coeficiente convectivo de transferência de massa (h). As amostras na forma de espumas secas a 80 °C apresentaram os maiores D_{ef} e h , e as amostras trituradas secas a 50 °C apresentaram os menores D_{ef} e h . Os resultados sugerem que a estrutura mais porosa do resíduo integral pode ter favorecido a perda de água durante os instantes iniciais da secagem. Assim, se o objetivo principal do processo é a retirada de água do produto antes de se atingir o equilíbrio, isto é, até um teor de água intermediário, a melhor condição experimental é, de maneira geral, a que envolve o resíduo não tratado/integral. Dentre os modelos difusivos propostos neste estudo, o modelo 1 mostrou-se mais adequado para descrever a perda de água no processo de secagem do resíduo de cumbeba. A energia de ativação variou na seguinte ordem: resíduo na forma de espuma > resíduo triturado > resíduo inteiro. Por meio de simulações obtidas com o modelo proposto (modelo 1), observou-se a influência da temperatura e do tempo de secagem na distribuição de água no interior do resíduo triturado. O resíduo de cumbeba integral seco a 80 °C apresentou maiores teores de compostos fenólicos totais, flavonoides, antocianinas e betalaínas.

No geral, os resultados fornecem informações que apoiam a hipótese do uso da secagem convectiva como um método de secagem eficaz e promissor para a recuperação de compostos fenólicos do resíduo de cumbeba, principalmente na sua forma integral. Como os compostos bioativos fornecem benefícios à saúde, um extrato de compostos fenólicos do resíduo de cumbeba pode ser de grande interesse para aplicação em alimentos e produtos farmacêuticos. Contudo, até onde se sabe, este é o primeiro estudo que investiga de forma abrangente a secagem convectiva e sua relação com a composição de bioativos do resíduo de cumbeba. Para superar esse problema, estudos futuros sobre a otimização do processo de

extração e caracterização mais detalhada, como composição individual e atividade antioxidante, dos compostos bioativos do resíduo de cumbeba são necessários.

ANEXO A

ANEXO A - Documento de registro da publicação do Artigo I na revista Foods



Article

Utilization of Cumbeba (*Tacinga inamoena*) Residue: Drying Kinetics and Effect of Process Conditions on Antioxidant Bioactive Compounds

João Paulo de Lima Ferreira ¹, Alexandre José de Melo Queiroz ^{1,*}, Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo ¹, Wilton Pereira da Silva ², Josivanda Palmeira Gomes ¹, Dyego da Costa Santos ³, Hanndson Araujo Silva ⁴, Ana Paula Trindade Rocha ⁵, Anna Catarina Costa de Paiva ⁵, Alan Del Carlos Gomes Chaves ⁶, Antônio Gilson Barbosa de Lima ⁶ and Romário Oliveira de Andrade ⁷

¹ Department of Agricultural Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande 58429-900, Brazil; joap_1@hotmail.com (J.P.d.L.F.); rossanamff@gmail.com (R.M.F.d.F.); josivanda@gmail.com (J.P.G.)

² Department of Physics, Federal University of Campina Grande, Campina Grande 58429-900, Brazil; wiltonps@uol.com.br

³ Department of Technology in Agroindustry, Federal Institute of Acre, Xapuri 69930-000, Brazil; dyego.csantos@gmail.com

⁴ Department of Processes Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande 58429-900, Brazil; hanndson@gmail.com

⁵ Department of Food Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande 58429-900, Brazil; ana_trindade@yahoo.com.br (A.P.T.R.); ann.paiva@hotmail.com (A.C.C.d.P.)

⁶ Department of Mechanical Engineering, Federal University of Campina Grande, Campina Grande 58429-900, Brazil; alandcg@hotmail.com (A.D.C.G.C.); antonio.gilson@ufcg.edu.br (A.G.B.d.L.)

⁷ Department of Technology in Agroindustry, Federal Institute of Alagoas, Piranhas 57460-000, Brazil; romario.andrade@ifal.com.br

* Correspondence: alexandrejm@gmail.com; Tel.: +55-83-996-594-641



Citation: Ferreira, J.P.d.L.;

Queiroz, A.J.d.M.;

Figueirêdo, R.M.F.d.; Silva, W.P.d.;

Gomes, J.P.; Santos, D.d.C.;

Silva, H.A.; Rocha, A.P.T.;

Paiva, A.C.C.d.; Chaves, A.D.C.G.;

et al. Utilization of Cumbeba (*Tacinga**inamoena*) Residue: Drying Kinetics

and Effect of Process Conditions on

Antioxidant Bioactive Compounds.

Foods **2021**, *10*, 788. <https://doi.org/10.3390/foods10040788>

10.3390/foods10040788

Academic Editors: Ana Blandino and Ana Belen Diaz

Received: 10 March 2021

Accepted: 3 April 2021

Published: 6 April 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article

distributed under the terms and

conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/><https://creativecommons.org/licenses/by/>

Abstract: The residue generated from the processing of *Tacinga inamoena* (cumbeba) fruit pulp represents a large amount of material that is discarded without proper application. Despite that, it is a raw material that is source of ascorbic acid, carotenoids and phenolic compounds, which are valued in nutraceutical diets for allegedly combating free radicals generated in metabolism. This research paper presents a study focused on the mathematical modeling of drying kinetics and the effect of the process on the level of bioactive of cumbeba residue. The experiments of cumbeba residue drying (untreated or whole residue (WR), crushed residue (CR) and residue in the form of foam (FR)) were carried out in a fixed-bed dryer at four air temperatures (50, 60, 70 and 80 °C). Effective water diffusivity (D_{eff}) was determined by the inverse method and its dependence on temperature was described by an Arrhenius-type equation. It was observed that, regardless of the type of pretreatment, the increase in air temperature resulted in higher rate of water removal. The Midilli model showed better simulation of cumbeba residue drying kinetics than the other models tested within the experimental temperature range studied. Effective water diffusivity (D_{eff}) ranged from 6.4890 to $11.1900 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 2.9285 to $12.754 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and 1.5393×10^{-8} to $12.4270 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ with activation energy of 22.3078, 46.7115 and 58.0736 kJ/mol within the temperature range of 50–80 °C obtained for the whole cumbeba, crushed cumbeba and cumbeba residue in the form of foam, respectively. In relation to bioactive compounds, it was observed that for a fixed temperature the whole residue had higher retention of bioactive compounds, especially phenolic compounds, whereas the crushed residue and the residue in the form of foam had intermediate and lower levels, respectively. This study provides evidence that cumbeba residue in its whole form can be used for the recovery of natural antioxidant bioactive compounds, mainly phenolic compounds, with the possibility of application in the food and pharmaceutical industries.

Keywords: by-product; pretreatments; convective drying; effective water diffusivity; phenolic compounds

ANEXO B

ANEXO B - Documento de registro da publicação do Artigo II na revista Foods



Article

Description of Cumbeba (*Tacinga inamoena*) Waste Drying at Different Temperatures Using Diffusion Models

João P. L. Ferreira ^{1,*}, Wilton P. Silva ¹, Alexandre J. M. Queiroz ¹,
 Rossana M. F. Figueirêdo ¹, Josivanda P. Gomes ¹, Bruno A. Melo ¹, Dyego C. Santos ²,
 Thalís L. B. Lima ¹, Rodolfo R. C. Branco ¹, Ihsan Hamawand ³ and Antonio G. B. Lima ¹

- ¹ Federal University of Campina Grande, Campina Grande 58428-830, Brazil; wiltonps@uol.com.br (W.P.S.); alexandrejmq@gmail.com (A.J.M.Q.); rossanamff@gmail.com (R.M.F.F.); josivanda@gmail.com (J.P.G.); b.amelo@yahoo.com (B.A.M.); thallisma@gmail.com (T.L.B.L.); rodolfo.castelobranco@outlook.com (R.R.C.B.); antonio.gilson@ufcg.edu.br (A.G.B.L.)
² Federal Institute of Acre, Xapuri 69930-000, Brazil; dyego.csantos@gmail.com
³ University of Southern Queensland, Toowoomba, QLD 4350, Australia; ihsan.hamawand@gmail.com
 * Correspondence: joaop_l@hotmail.com; Tel.: +55-83-996594641

Received: 6 November 2020; Accepted: 2 December 2020; Published: 3 December 2020



Abstract: One approach to improve sustainable agro-industrial fruit production is to add value to the waste generated in pulp extraction. The processing of cumbeba (*Tacinga inamoena*) fruits generates a significant amount of waste, which is discarded without further application but can be a source of bioactive compounds, among other nutrients. Among the simplest and most inexpensive forms of processing, convective drying appears as the first option for the commercial utilization of fruit derivatives, but it is essential to understand the properties of mass transfer for the appropriate choice of drying conditions. In this study, cumbeba waste was dried at four temperatures (50, 60, 70 and 80 °C). Three diffusion models were fitted to the experimental data of the different drying conditions. Two boundary conditions on the sample surface were considered: equilibrium condition and convective condition. The simulations were performed simultaneously with the estimation of effective mass diffusivity coefficients (D_{eff}) and convective mass transfer coefficients (h). The validation of the models was verified by the agreement between the theoretical prediction (simulation) and the experimental results. The results showed that, for the best model, the effective mass diffusivities were 2.9285×10^{-9} , 4.1695×10^{-9} , 8.1395×10^{-9} and 1.2754×10^{-8} m²/s, while the convective mass transfer coefficients were 6.4362×10^{-7} , 8.7273×10^{-7} , 8.9445×10^{-7} and 1.0912×10^{-6} m/s. The coefficients of determination were greater than 0.995 and the chi-squares were lower than 2.2826×10^{-2} for all simulations of the experiments.

Keywords: by-product; drying kinetics; analytical solution; effective mass diffusivity; convective mass transfer coefficient; activation energy

ANEXO C

ANEXO C - Documento de registro do depósito da patente intitulada “Resíduo de cumbeba em pó obtido pelo processo de secagem convectiva”



28/04/2021 870210038336
10:52

29409161931655960

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2021 008090 6

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - PB

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 05055128000176

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: AV. APRIGIO VELOSO, 882 - UNIVERSITÁRIO

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58429900

País: Brasil

Telefone: (83) 2011601

Fax: (83) 21011601

Email: nitt@ufcg.edu.br

**PETICIONAMENTO
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Petição Eletrônica em 28/04/2021 às 10:52, Petição 870210038336