



CINÉTICA DE SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DA *MENTHA CRISPA* E AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS

Ana Carolina Nóbrega Leite¹ , Josilene de Assis Cavalcante² , Nagel Alves Costa²  & Williane Silva Pinheiro³ 

1 - Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brazil

2 - Federal University of Paraíba, Department of Chemical Engineering, João Pessoa, Paraíba, Brazil

3 - Federal University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

Palavras-chave:

Desidratação
Hortelã
Mentha spicata L.
Modelagem matemática
Teor de água

RESUMO

A hortelã-da-folha-miúda (*Mentha crispata*) é uma planta comumente utilizada na medicina popular para tratamento de enfermidades e possui vasta aplicação industrial. A desidratação vem sendo empregada para diversos tipos de plantas com o intuito de diminuir os níveis de teor de água e atividade de água, a fim de permitir um armazenamento adequado em função da conservação dos princípios ativos. O trabalho tem como objetivo estudar o processo de secagem em camada de espuma da hortelã-da-folha-miúda. A espuma foi caracterizada fisicamente em termos de densidade, porcentagem de expansão, capacidade de incorporação de ar e estabilidade. A secagem foi realizada de acordo com um planejamento experimental fatorial, no qual as variáveis de entrada foram: temperatura (50, 60 e 70 °C), concentração de agente espumante (3, 5 e 7 %) e tempo de agitação (3, 5 e 7 min); e as variáveis de saída foram: tempo de secagem e teor de água (X_{bs}) do produto. As propriedades físicas da espuma apresentaram dependência apenas da concentração de espumante. O aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo de secagem e o teor de água da espuma. Os modelos matemáticos Page, Henderson & Pabis, Newton e Page Modificado foram ajustados aos dados experimentais e o de Page foi o que se mostrou mais adequado para representar o fenômeno de secagem.

Keywords:

Dehydration
Mint
Mentha spicata L.
Mathematical modeling
Water content

KINETICS OF DRYING IN A *MENTHA CRISPA* FOAM LAYER AND ADJUSTMENT OF MATHEMATICAL MODELS

ABSTRACT

Mentha crispata is a plant commonly used in folk medicine to treat illnesses and has wide industrial application. Dehydration has been used for several types of plants in order to reduce the levels of water content and water activity, so that it would allow na adequate storage due to the conservation of the active principles. The objective of this work is to investigate the process of drying mint in a foam layer. The foam was physically characterized in terms of density, expansion percentage, air incorporation capacity and stability. Drying was carried out according to a factorial experimental design, in which the input variables were: temperature (50, 60 and 70 °C), concentration of foaming agent (3, 5 and 7 %) and stirring time (3, 5 and 7 min); and the output variables were: drying time and water content (X_{bs}) of the product. The physical properties of the foam depended only on the foaming concentration. The rise in the temperature significantly reduced the drying time and the water content of the foam. The Page, Henderson & Pabis, Newton and Modified Page mathematical models were adjusted to the experimental data and Page's model was the one that showed to be the most adequate to represent the drying phenomenon.

INTRODUÇÃO

Historicamente, as plantas medicinais são importantes como fitoterápicos e na descoberta de novos fármacos, estando no reino vegetal a maior contribuição de medicamentos. Pesquisadores da área de produtos naturais mostram-se impressionados pelo fato desses produtos encontrados na natureza revelarem uma gama enorme de diversidade em termos de estrutura e de propriedades físico-químicas e biológicas (BRASIL, 2012; GUERRA & NODARI, 2001).

A família *Labiatae* inclui cerca de 220 gêneros e 3.300 espécies amplamente utilizadas para diversas finalidades em todo o mundo. Plantas pertencentes à família *Labiatae* são ricas em compostos polifenólicos e um grande número deles é bem conhecido por suas propriedades antioxidantes, sendo amplamente utilizadas na medicina tradicional para exaustão, fraqueza, depressão, melhoria da memória, melhoria da circulação, fortalecimento dos vasos sanguíneos frágeis, inflamação, infecção, indigestão e gastrite (BENABDALLAH *et al.*, 2016; SHEKARCHI *et al.*, 2012).

O gênero *Mentha* é um importante membro da família *Labiatae*, que inclui dezoito espécies e onze híbridos (BENABDALLAH *et al.*, 2016). A *Mentha crispa*, também conhecida como hortelã-da-folha-miúda no Brasil, se origina do cruzamento entre *Mentha spicata* L. e *Mentha suaveolens* Ehrh (ZEMIANI *et al.*, 2021). A hortelã-da-folha-miúda é uma das espécies economicamente significativas do gênero e distribui-se por todo o mundo, em regiões tropicais e temperadas. De acordo com a classificação moderna, a *Mentha crispa* é sinônimo de hortelã *Mentha spicata* L., e tratam-se de espécies que são caracterizadas por uma lâmina foliar fortemente ondulada (MALANKINA *et al.*, 2022).

O interesse econômico nas espécies de *Mentha* deve-se, principalmente, à exploração comercial dos óleos essenciais que são substâncias complexas com grande polimorfismo químico (DESCHAMPS *et al.*, 2008). Um dos compostos predominantes encontrados nas espécies do gênero é o monoterpeno rotundifolona (óxido de piperitenona), e o óleo essencial de *Mentha crispa* contém cerca de 70%

deste composto vegetal secundário (DE SOUSA *et al.*, 2016). Além disso, o óleo essencial de *M. crispa* possui várias propriedades biológicas, incluindo antinociceptiva, espasmolítica, antimicrobiana, larvicida, tripanocida, citotóxica e antitumoral (TURKEZ *et al.*, 2018).

As plantas medicinais são utilizadas em diversas formas, mas a indústria farmacêutica possui maior interesse pelos extratos vegetais secos, uma vez que as formas sólidas oferecem maiores vantagens sobre as formas convencionais líquidas, tais como maior concentração e estabilidade das substâncias ativas, além de facilidade de padronização e manuseio, contribuindo para a garantia da homogeneidade de preparações farmacêuticas (GALLO *et al.*, 2013). O controle de umidade na conservação de espécies vegetais também é de extrema importância, pois tem influência direta na atividade metabólica, multiplicação, resistência e sobrevivência de microrganismos (RIGUETO *et al.*, 2018).

A redução da água livre pode ser obtida através da secagem, que contribui para a conservação e uso prolongado de materiais biológicos (SILVA & PEDRO, 2018). Essa operação unitária tem como objetivo reduzir e inibir as atividades químicas, enzimáticas e microbiológicas que são responsáveis pela deterioração dos alimentos (BALDI *et al.*, 2021). Isto implica menores custos de transporte, embalagem e armazenamento dos alimentos, já que os produtos podem ser estocados em temperatura ambiente sem a necessidade de refrigeração (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

A secagem em camada de espuma é uma técnica que converte alimentos líquidos ou semi-líquidos em espuma estável por meio da cooperação com agentes espumantes ou estabilizantes, podendo ser aplicada em diversos tipos de alimentos. Esse método é relativamente simples e pode ser realizado a um custo menor do que a secagem por *spray drying* e liofilização, além de ser realizado em temperaturas mais baixas, o que ajuda a manter os nutrientes nos vegetais (MEI LING & SULAIMAN, 2018). Outra vantagem desse método é que ele proporciona um tempo de secagem menor devido à maior área superficial exposta ao calor durante a secagem e ao fornecimento de aquecimento uniforme, acelerando assim a taxa de

difusão da umidade. Os pós obtidos por meio desse processo reduzem a atividade de água, prolongam a vida útil, possuem alto potencial econômico e podem ser facilmente reconstituídos (MOHAMED *et al.*, 2022).

No estudo da secagem, otimização, determinação da viabilidade comercial e aperfeiçoamento e dimensionamento de equipamentos, são de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (COELHO *et al.*, 2019). As condições de secagem, o tipo de secador e as características do material a ser desidratado têm influência na cinética de secagem (ONWUDE *et al.*, 2016). Diversos modelos matemáticos têm sido empregados para descrever a perda de água durante o processo de secagem, nas condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos.

Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo estudar o processo de secagem em camada de espuma da hortelã-da-folha-miúda (*Mentha crispa*) através da caracterização física da espuma, obtenção das curvas de cinética e ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais e avaliação da influência das variáveis independentes do processo sobre o tempo de secagem e teor de água do produto.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Termodinâmica, pertencente ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa – PB, Brasil. A hortelã-da-folha-miúda (*Mentha crispa*) foi obtida fresca, no comércio local da cidade de João Pessoa – PB, da Empresa Hortaliças Sempre Verde e conduzida até o Laboratório de Termodinâmica, aonde foram sanitizadas de acordo com a Resolução RDC nº 218/2005 da ANVISA (BRASIL, 2005), que regulamenta procedimentos higiênico-sanitários para manipulação de alimentos e bebidas preparados com vegetais. Os ramos de hortelã utilizados no preparo foram submetidos à seleção para retirada de partes e/ou unidades deterioradas, vetores, sujidades e outras matérias estranhas e depois lavados e desinfetados. Posteriormente foram retiradas as hastes e ramos

da planta e preparado um derivado vegetal das folhas, utilizando uma percentagem 15% m/v de folha/água destilada, através de trituração em liquidificador industrial de alta rotação Metvisa, em potência máxima de 800 W, a uma velocidade de 18000 rpm por cerca de um (01) minuto, para obtenção de uma mistura homogênea.

Planejamento experimental e análise estatística

O planejamento experimental fatorial completo foi utilizado para avaliar a eficiência do processo de secagem em camada de espuma da hortelã-da-folha-miúda, a fim de verificar efeitos significativos das variáveis de entrada sobre as variáveis respostas. A definição das variáveis independentes do processo embasou-se em estudos da secagem em camada de espuma da folha da amoreira negra (SILVA, 2019), folha da gravioleira (OLIVEIRA *et al.*, 2020) e da entrecasca do juazeiro (MOREIRA *et al.*, 2021). A matriz planejamento estudada verificou as influências das variáveis de entrada: tempo de agitação para a produção da espuma, concentração percentual de agente espumante e temperatura de secagem; sobre as variáveis respostas: tempo de secagem e teor de água final. Os valores não codificados foram definidos a partir de testes preliminares e estão apresentados na Tabela 1.

O planejamento experimental fatorial completo utilizado neste trabalho foi do tipo 2^3 ($2 \times 2 \times 2$) com três repetições no ponto central, resultando em uma matriz com 11 experimentos. Visando obedecer à aleatoriedade do planejamento experimental, os ensaios não foram realizados na ordem em que se encontram na matriz do planejamento adotado, descrita na Tabela 2.

Na análise estatística do planejamento experimental fatorial foi utilizado o pacote computacional Statistica versão 7.0. O programa foi empregado para cálculos dos efeitos principais e de interações das variáveis independentes sobre as respostas e para análise de variância (ANOVA), possibilitando a otimização do processo de secagem.

Produção da espuma

Os testes preliminares com a hortelã-da-folha-miúda se basearam no estudo de Bag *et al.* (2011), que relatam que espumas que não colapsam por pelo menos 1 hora à temperatura

Tabela 1. Valores codificados e reais das variáveis independentes

Valores independentes	Nível (-1)	Ponto central (0)	Nível (+1)
Concentração (%)	3	5	7
Temperatura (°C)	50	60	70
Tempo de agitação (min)	3	5	7

Fonte: Autoria própria

Tabela 2. Matriz do planejamento experimental

Experimento	C (%)	T (°C)	t _{ag} (min)
1	3 (-1)	50 (-1)	3 (-1)
2	7 (+1)	50 (-1)	3 (-1)
3	3 (-1)	70 (+1)	3 (-1)
4	7 (+1)	70 (+1)	3 (-1)
5	3 (-1)	50 (-1)	7 (+1)
6	7 (+1)	50 (-1)	7 (+1)
7	3 (-1)	70 (+1)	7 (+1)
8	7 (+1)	70 (+1)	7 (+1)
9	5 (0)	60 (0)	5 (0)
10	5 (0)	60 (0)	5 (0)
11	5 (0)	60 (0)	5 (0)

C = concentração de agente espumante; T = temperatura de secagem; t_{ag} = tempo de agitação

ambiente são consideradas mecanicamente estáveis para o processo de secagem. Os aditivos carboximetilcelulose sódica, albumina, gelatina e o emulsificante Portogel® foram avaliados em função da estabilidade da espuma e da concentração. O agente espumante que se mostrou mais eficiente e apropriado às exigências do processo foi o aditivo alimentar sintético Portogel®, que possui composição química de água, propileno glicol, monoglicerídeos destilados, éster de poliglicerol e estearato de potássio. Para a produção da espuma, o derivado vegetal obtido, juntamente com o emulsificante, foi agitado em batedeira Philco Paris Cristal Maxx com potência de 400W, na velocidade 6 de agitação. A velocidade de agitação foi a máxima do equipamento e foi fixada para a realização de todos os experimentos.

Análise das propriedades físicas da espuma

Segundo método de Brock *et al.* (2008), a densidade da espuma deve ser medida em temperatura ambiente (25±1 °C) e as amostras de espuma pesadas em provetas graduadas. Após a pesagem, a densidade foi determinada utilizando a relação entre massa medida e o volume da proveta

utilizada, previamente aferido com água destilada à temperatura ambiente (Equação 1).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Em que,

ρ = densidade da espuma (g/cm³);

m = massa da espuma (g);

v = volume ocupado pela espuma (cm³).

O percentual de expansão da espuma foi obtido a partir dos valores previamente calculados de densidade do derivado vegetal das folhas e de suas respectivas espumas, conforme Equação 2 e metodologia descrita por Feitosa *et al.* (2017).

$$\%expansão = \left(\frac{\frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_s}}{\frac{1}{\rho_s}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que,

%expansão = percentual de expansão da espuma (%);

ρ_e = densidade da espuma (g/cm³);

ρ_s = densidade do suco (g/cm³)

A capacidade de incorporação de ar está relacionada com o volume de ar introduzido em uma solução, sendo determinado pelo aumento de

volume da espuma formada, e foi obtida conforme metodologia de Moreira *et al.* (2021). O cálculo do percentual de capacidade de incorporação de ar foi realizado a partir dos valores do volume da mistura antes do batimento e após o batimento, conforme Equação 3.

$$\%over\ run = \left(\frac{V_f - V_i}{V_i}\right) \times 100 \tag{3}$$

Em que,

%over run = percentual de capacidade de incorporação de ar (%);

V_f = volume da espuma após agitação (cm^3);

V_i = volume inicial antes da agitação (cm^3).

A estabilidade da espuma foi avaliada segundo metodologia citada por Karim e Cheewai (1999), adaptada de um antigo método descrito por Sauter e Montoure (1972). O método de drenagem baseia-se em depositar a espuma em um filtro de nylon suportado por um funil em uma proveta graduada e submetê-la a condições idênticas às encontradas durante a secagem.

Todas as determinações analíticas das propriedades físicas da espuma foram realizadas em triplicata. Os dados experimentais da caracterização das amostras foram analisados estatisticamente empregando o delineamento inteiramente casualizado com a comparação entre médias, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando-se o programa computacional ASSISTAT versão 7.7 Beta (SILVA & AZEVEDO, 2016).

Secagem em camada de espuma

As espumas foram dispostas em bandejas de alumínio com espessura fixa de 0,5 cm e colocadas em uma estufa com circulação e renovação de ar SL 102/221 Solab, nas temperaturas definidas pelo planejamento experimental (Tabela 2). A redução do teor de água foi determinada por pesagens da amostra em balança semi-analítica, em intervalos de tempo de 5, 10, 30 e 60 minutos. Três medições

consecutivas foram adotadas como critério para determinação de massa constante em intervalos regulares de 60 min, sem alteração na massa das amostras (MATOS *et al.*, 2022). O material seco foi removido das bandejas com auxílio de espátulas, pesado e posteriormente acondicionado em sacos herméticos de polietileno. Determinou-se o teor de água das amostras em estufa à 105 °C, em triplicata, de acordo com a metodologia Adolfo Lutz (2008).

De acordo com a Equação 4, determinou-se a razão do teor de água da hortelã-da-folha-miúda durante a secagem em estufa, nas diferentes condições de temperatura. Com os dados obtidos experimentalmente através da cinética de secagem, as curvas de secagem foram plotadas utilizando o Origin versão 6.0.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \tag{4}$$

Em que,

RX = razão do teor de água (adimensional);

X = teor de água da amostra em um determinado tempo de secagem (bs);

X_i = teor de água inicial da amostra (bs);

X_e = teor de água de equilíbrio da amostra (bs).

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem; e embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento de alguns alimentos, na maioria das vezes, as relações semiempíricas e empíricas têm sido as melhores opções para descrever o processo de secagem (BROOKER *et al.*, 1992). Diferentes modelos propostos na literatura foram ajustados na previsão da cinética de secagem em camada de espuma da hortelã-da-folha-miúda (Tabela 3).

A análise de regressão não linear foi realizada pelo método de estimativa Gauss-Newton e os modelos foram ajustados com o auxílio do programa computacional Statistica versão 6.0. Para

Tabela 3. Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem

Designação do modelo	Modelo	Equação
PAGE	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	(5)
HENDERSON & PABIS	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(6)
MIDILLI & KUCUK	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(7)
NEWTON	$RX = \exp(-k \cdot t)$	(8)
PAGE MODIFICADO (Mangueira et al., 2020)	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n)$	(9)

Onde: RX = razão do teor de água do produto (adimensional); t = tempo de secagem (h); k = coeficientes de secagem; a, n = constantes dos modelos matemáticos

avaliar o ajuste matemático das curvas de cinética de secagem, os modelos foram selecionados considerando a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) (Equação 10), erro padrão da estimativa (S) (Equação 11), erro quadrático médio (MSE) (Equação 12) e teste qui-quadrado (χ^2) (Equação 13).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2} \quad (10)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2}{GLR}} \quad (11)$$

$$MSE = \frac{\sum (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2}{n} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2}{GLR} \quad (13)$$

Em que,

$RX_{pred,i}$ = razão do teor de água predito pelo modelo;

$RX_{exp,i}$ = razão do teor de água experimental;

n = número de observações experimentais;

GLR = graus de liberdade do modelo.

Também foi calculada a taxa de secagem, a partir da relação entre o teor de água (b.s.) e os tempo de secagem e área de secagem da espuma, de acordo com a Equação 14.

$$W = -\frac{m_{ss} \cdot dX_{bs}}{A \cdot dt} \quad (14)$$

Em que,

W = taxa de secagem ($g/cm^2 \cdot min$);

m_{ss} = massa de sólidos secos da amostra (g);

A = área de secagem (cm^2);

X_{bs} = umidade em base seca; t = tempo (min).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades físicas da espuma estão apresentadas na Tabela 4. Como a variável

temperatura não possui influência nas caracterizações físicas da espuma, pois são análises que antecedem a secagem, seu efeito foi desprezado nas análises estatísticas. Os resultados de cada análise estatística, para o nível de confiança de 95%, foram expressos em gráficos de pareto.

A partir da Tabela 4, nota-se que o experimento 2 apresentara o maior valor de densidade e o experimento 5 apresenta o menor valor. Tais observações podem ser explicadas devido à variável concentração de emulsificante (%), que se encontra em menor concentração nos experimentos de maior densidade e em maior concentração nos experimentos de menor densidade. Esse comportamento é compatível com a premissa de que quanto menor o volume ocupado por determinada massa, maior será sua densidade.

A densidade das espumas é uma propriedade muito importante em se avaliar, pois ela exerce grande influência na estabilidade assim como na eficiência do processo de secagem. Kudra e Ratti (2006) relatam que espumas com menor densidade apresentam uma maior estabilidade e facilitam a retirada da água durante a secagem, podendo assim serem desidratadas a temperaturas mais brandas.

De acordo com os resultados obtidos pode ser observado que a faixa de variação da densidade da espuma de hortelã-da-folha-miúda entre 0,1457 e 0,1777 g/cm^3 apresenta uma boa estabilidade, mostrando-se viável para a utilização da técnica de secagem em camada de espuma. Estes valores estão dentro da faixa prevista por Van Arsdel e Copley (1964), que sugerem valores entre 0,1 a 0,6 g/cm^3 para uma espuma ideal para realização da desidratação.

Ao analisar o Gráfico de Pareto (Figura 1), apenas a variável concentração de espumante e a interação entre a concentração e o tempo de agitação são estatisticamente significativas para o nível de confiança de 95% ($p < 0,05$), ou seja, que afetam de maneira significativa a densidade da espuma.

Tabela 4. Propriedades físicas da espuma de hortelã-da-folha-miúda

Experimento	Densidade (g/cm^3)	Expansão (%)	Incorporação de ar (%)
1 (C 3%; t_{ag} 3 min)	0,1649 \pm 0,0089 a	415,52 \pm 36,31 a	480,00 \pm 16,33 c
2 (C 3%; t_{ag} 7 min)	0,1777 \pm 0,0024 a	376,78 \pm 12,79 a	506,67 \pm 9,43 c
3 (C 5%; t_{ag} 5 min)	0,1542 \pm 0,0069 a	453,01 \pm 26,34 a	682,50 \pm 26,69 ab
4 (C 7%; t_{ag} 3 min)	0,1625 \pm 0,0002 a	421,15 \pm 10,37 a	616,67 \pm 30,91 b
5 (C 7%; t_{ag} 7 min)	0,1457 \pm 0,0189 a	489,79 \pm 68,01 a	713,33 \pm 33,99 a

Os valores representam média \pm desvio padrão. Letras diferentes na mesma linha diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). C = concentração de agente espumante; t_{ag} = tempo de agitação

A análise também mostra que a concentração e o tempo de agitação exercem uma influência de sinal negativo na densidade, de modo que, quanto menores forem os seus valores, maior será o valor da densidade. A partir da análise estatística foi possível gerar um modelo, por intermédio de regressão linear dos dados experimentais do processo, da correlação da densidade com as variáveis independentes concentração de espumante (C) e o tempo de agitação (T_{ag}). Esse modelo possuiu uma percentagem de variação explicada de 80,13% e um erro padrão de 0,0000166 e é representado pela Equação 15.

$$Densidade = 0,1603 - 0,0171C - 0,0148T_{ag}C \quad (15)$$

O percentual de expansão da espuma é uma importante característica a ser estudada para avaliar a eficiência do método utilizado para formação da espuma. Um alto percentual de expansão indica que uma maior quantidade de ar está presa na espuma, e uma baixa concentração

de espuma não é capaz de formar uma espessura crítica de lamela adequada para manter as bolhas de ar formadas aprisionadas. Susanti *et al.* (2021) afirmam que o percentual da expansão indica a capacidade do agente emulsificante em criar as bolhas sem ruptura. Ainda segundo os autores, tempos de batimentos muito longos podem causar a ruptura da microestrutura da espuma, por meio da coagulação das proteínas para formar agregados insolúveis e diminuir a capacidade de retenção de água.

Observa-se, a partir da Tabela 4, que o valor mais elevado de expansão média foi o do experimento 5 (489,79%), onde foi utilizada a máxima concentração de emulsificante e o tempo de agitação máximo do planejamento experimental. Já o experimento 2 (376,78%) apresentou o menor percentual de expansão médio, onde o tempo de agitação utilizado foi o do nível superior do planejamento e a concentração de espumante foi a

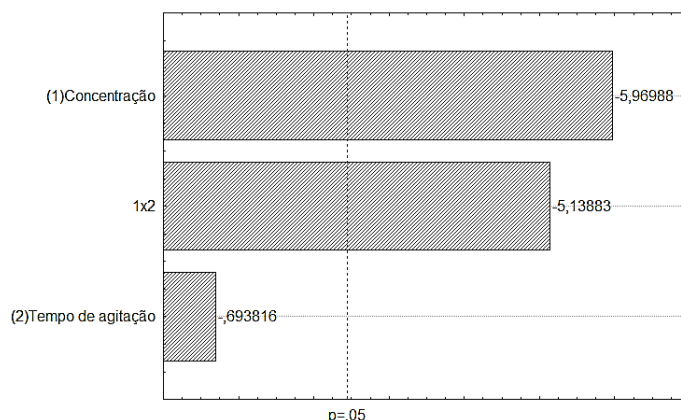


Figura 1. Gráfico de Pareto: Efeito da concentração de espumante e do tempo de agitação na densidade da espuma da hortelã-da-folha-miúda

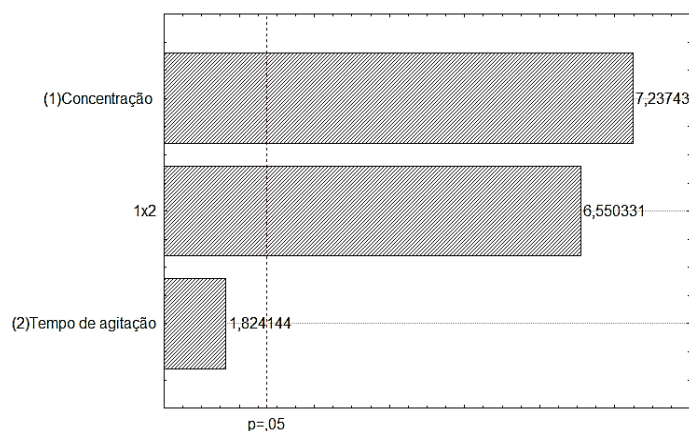


Figura 2. Gráfico de Pareto: Efeito da concentração de espumante e do tempo de agitação no percentual de expansão da espuma da hortelã-da-folha-miúda

mínima. Oliveira et al. (2020) também observaram que menores densidades da espuma acarretam uma maior incorporação e retenção de ar, e, conseqüentemente, maior expansão da espuma.

A análise estatística (Figura 2) mostra que apenas a variável concentração de espumante e a interação entre as duas variáveis são estatisticamente significativas ($p < 0,05$). Ambas as variáveis exercem uma influência de sinal positivo no percentual de expansão, de modo que, quanto maiores forem os seus valores, maior será a expansão da espuma. O modelo gerado por intermédio de regressão linear dos dados experimentais do processo possuiu uma percentagem de variação explicada de 93,37% e pode ser representado pela Equação 16.

$$\%expansão = 430,02 + 59,32C + 53,69T_{ag}C \quad (16)$$

Outra importante propriedade física de espumas é a quantidade de gás ou ar que pode ser incorporado durante a sua mudança de estrutura, que passa de líquidaviscosa para sua estrutura semissólida. Os menores valores de capacidade de incorporação de ar para as espumas são aqueles ligados ao nível mínimo de concentração de emulsificante (Experimentos 1 e 2). Apesar do tempo de agitação entre eles variar entre o nível superior e o mínimo, houve uma diferença pouco expressiva entre os seus resultados de *%over run*. Já o maior valor obtido foi do experimento 5, no qual foram utilizados os níveis máximos da concentração de emulsificante e do tempo de agitação.

De acordo com o Gráfico de Pareto (Figura 3) da correlação da capacidade de incorporação de ar com as variáveis independentes concentração de espumante (C) e o tempo de agitação (T_{ag}), observa-se que somente a concentração é

estatisticamente significativa ($p < 0,05$). A capacidade de incorporação de ar da espuma segue a tendência oposta à densidade, de modo que para atingir uma maior e mais eficiente atividade espumante as melhores condições serão a de valores mais elevados. O modelo gerado possuiu uma percentagem de variação explicada de 69,5% e pode ser representado pela Equação 17.

$$\%over\ run = 610,30 + 171,66C \quad (17)$$

Uma dificuldade anteriormente experimentada com este processo e relatada por Karim e Cheewai (1999) é a falta de estabilidade da espuma durante o ciclo de aquecimento, pois se a espuma não permanecer estável a destruição celular ocorrerá, causando séria deterioração da operação. Segundo Cruz (2013), a estabilidade da espuma é de fundamental importância para o sucesso da secagem em camada de espuma, bem como para a qualidade do produto, tendo relação diretamente proporcional à adição de agentes de estabilização de espumas.

Como pode ser observado na Figura 4, as curvas dos testes de estabilidade apresentaram comportamento semelhante, mesmo com a variação da temperatura. Para a temperatura de 50 °C a perda máxima de volume foi de 6,6 mL, enquanto na temperatura de 70 °C o volume desprendido chegou a 11,4 mL. Em ambos os testes, as espumas que apresentaram maior desprendimento de volume foram aquelas com concentração de espumante no nível inferior (3%), com pouca dependência da variação dos valores de tempo de agitação. Os resultados indicam que a espuma formada com o emulsificante sintético se desestabiliza com o aumento da temperatura de secagem.

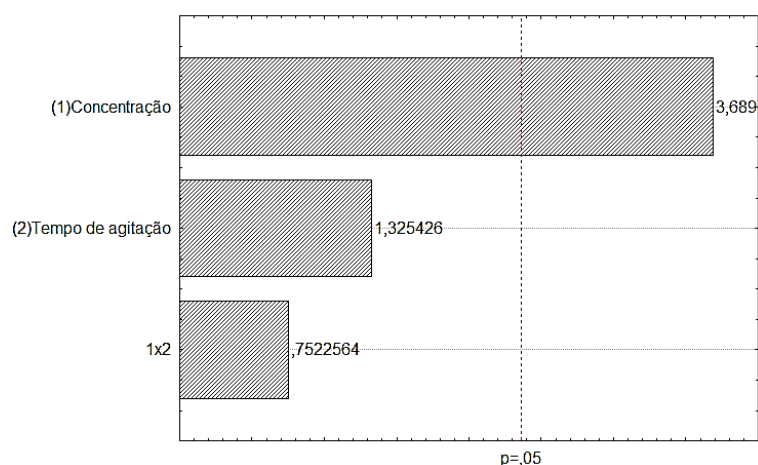


Figura 3. Gráfico de Pareto: Efeito da concentração de espumante e do tempo de agitação na capacidade de incorporação de ar da espuma da hortelã-da-folha-miúda

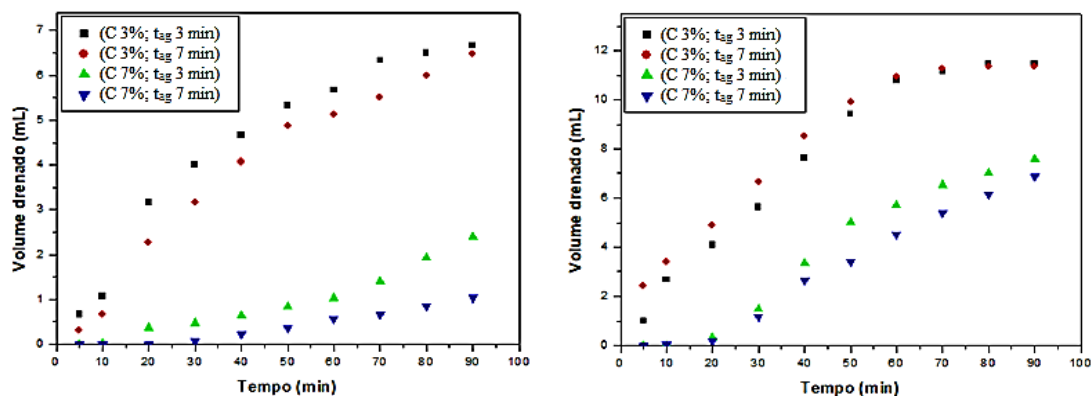


Figura 4. Testes de Estabilidade da espuma da hortelã-da-folha-miúda a 50 e 70 °C

Conforme Kandasamy *et al.* (2012) observaram, a estabilidade é influenciada pela densidade, espessura e permeabilidade da interface líquido-agente espumante, pela distribuição do tamanho das bolhas de ar e pela tensão superficial, porém a natureza e concentração do agente utilizado é um dos principais fatores que alteram esta propriedade. Outros fatores que podem ter comprometido a estabilidade da espuma e devem ser levados em conta diante desse comportamento é a alta espessura da camada de espuma e a baixa área superficial exposta ao ar de secagem durante o experimento. Bag *et al.* (2011) reportaram ainda que o colapso de espumas também pode ocorrer devido à força da gravidade atuando sobre a espuma pelo aumento do volume, que resulta em fusão de pequenas bolhas de ar.

As curvas da cinética de secagem de hortelã-da-folha-miúda são apresentadas na Figura 5. Os dados estão dispostos na forma de umidade adimensional (X/X_0) em função do tempo de secagem (min) para as temperaturas definidas pelo planejamento experimental, de 50, 60 e 70 °C respectivamente.

Como pode ser observado, o tempo de secagem variou de acordo com a temperatura utilizada no experimento, de tal forma que a elevação da temperatura reduziu o tempo significativamente. Verifica-se que nos experimentos submetidos a secagem a 70 °C, a umidade de equilíbrio foi atingida após 80 minutos, enquanto na temperatura de 50 °C somente após 180 minutos. A secagem ocorreu de forma rápida e este fato é naturalmente explicado pelo fato de que a hortelã é rica em óleos essenciais que evaporam facilmente quanto maior a temperatura utilizada no experimento (MATOS, 2002). Além disso, sabe-se que maiores

temperaturas acarretam uma maior transferência de calor entre a camada de espuma e o ar e, conseqüentemente, uma maior evaporação de água do produto, resultando em redução de teor de água e tempo de operação.

No estudo da cinética de secagem, a maioria dos autores cita que a secagem de alimentos apresenta período de taxa decrescente, podendo ser precedida ou não de um período de taxa constante (FELLOWS, 2000; DANTAS, 2010). Os dados da cinética de secagem apresentados na Figura 5 mostram a presença de um curto período de aquecimento no estágio inicial de secagem e em sequência um período de taxa constante, com período de taxa decrescente muito curto. No período de taxa constante a água está livremente disponível em torno das matrizes sólidas, podendo facilmente ser transportada por fluxo capilar e difusão de vapor. A pressão de vapor de água na superfície durante esse período é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa são compensadas, ocasionando uma velocidade de secagem constante (PARK *et al.*, 2014).

A ausência do período de taxa constante na secagem pode ocorrer devido à natureza da umidade, pois mesmo havendo umidade superficial livre, a água pode estar na forma de suspensão de células e de solução (açúcares e outras moléculas), apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura (SILVA *et al.*, 2008).

Outros autores ao trabalharem com diferentes métodos de secagem da espécie vegetal também encontraram resultados similares. Pachú (2007)

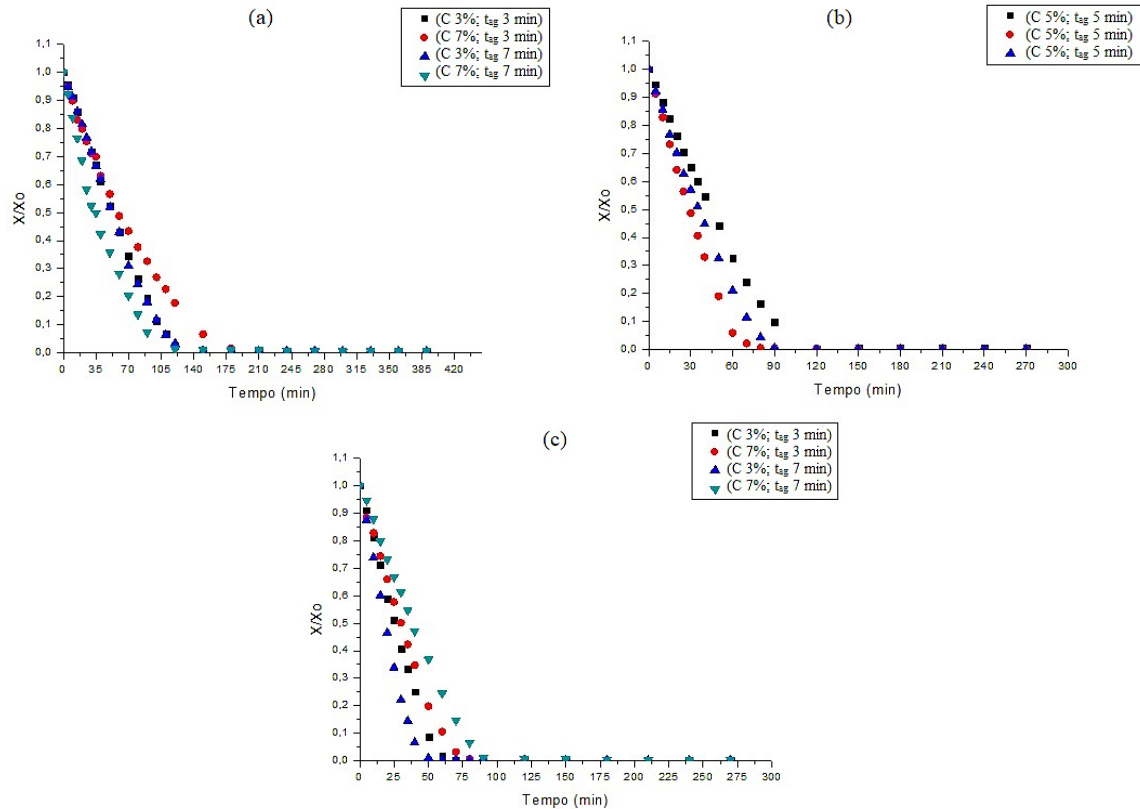


Figura 5. Curvas de secagem da espuma de hortelã-da-folha-miúda nas temperaturas de (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C

observou um comportamento semelhante nas curvas de cinética de secagem de hortelã-da-folha-miúda (*Mentha crispa*), nas temperaturas de 60 e 70 °C, obtidas em condições de convecção forçada através de camada delgada das folhas frescas. Fernandes *et al.* (2013) determinaram o comportamento da secagem da hortelã-da-folha-miúda em estufa com circulação de ar e obteve tempos de secagem de 3 h para a temperatura de 45 °C, 2 h para a temperatura de 55 °C e de 1 h e 15 min para a temperatura de 65 °C, evidenciando que as secagens das folhas são influenciadas pela temperatura de secagem, ocorrendo à secagem em menor tempo na temperatura mais elevada. Gasparin *et al.* (2017) também verificaram que a cinética de secagem da hortelã pimenta (*Mentha piperita*) em leito fixo foi fortemente influenciada pela temperatura e que a perda do conteúdo de umidade é mais rápida no início do processo de secagem, comportamento demonstrado através da inexistência do período de secagem constante.

No que se refere à técnica, Thuwapanichayanan *et al.* (2008) também relataram a ocorrência

predominante de período de taxa constante na secagem em camada de espuma de purê de banana, com maiores taxas de secagem a temperaturas de ar de secagem mais altas e baixas densidades de espuma. Outros autores também descreveram esse comportamento na secagem em camada de espuma da polpa de tamarindo (SILVA *et al.*, 2008), polpa da manga cv. Haden (SILVA FILHO *et al.*, 2016), folha da gravioleira (OLIVEIRA *et al.*, 2020) e polpa do umbu (SOUZA *et al.*, 2021).

Na Figura 6 são apresentados os gráficos da taxa de secagem em função teor de água. Observa-se que a temperatura de 70 °C apresentou taxa de secagem mais elevada em relação aos outros dois tratamentos, evidenciando a influência da temperatura sobre a taxa. De acordo com Fernandes *et al.* (2013), o efeito da temperatura se deve à sua influência sobre o potencial de transferência de água do sólido para o ar de secagem, dado que o aquecimento do ar a temperaturas mais elevadas implica na redução de sua umidade relativa, afetando diretamente o potencial de transferência de massa e podendo também alterar as propriedades físicas.

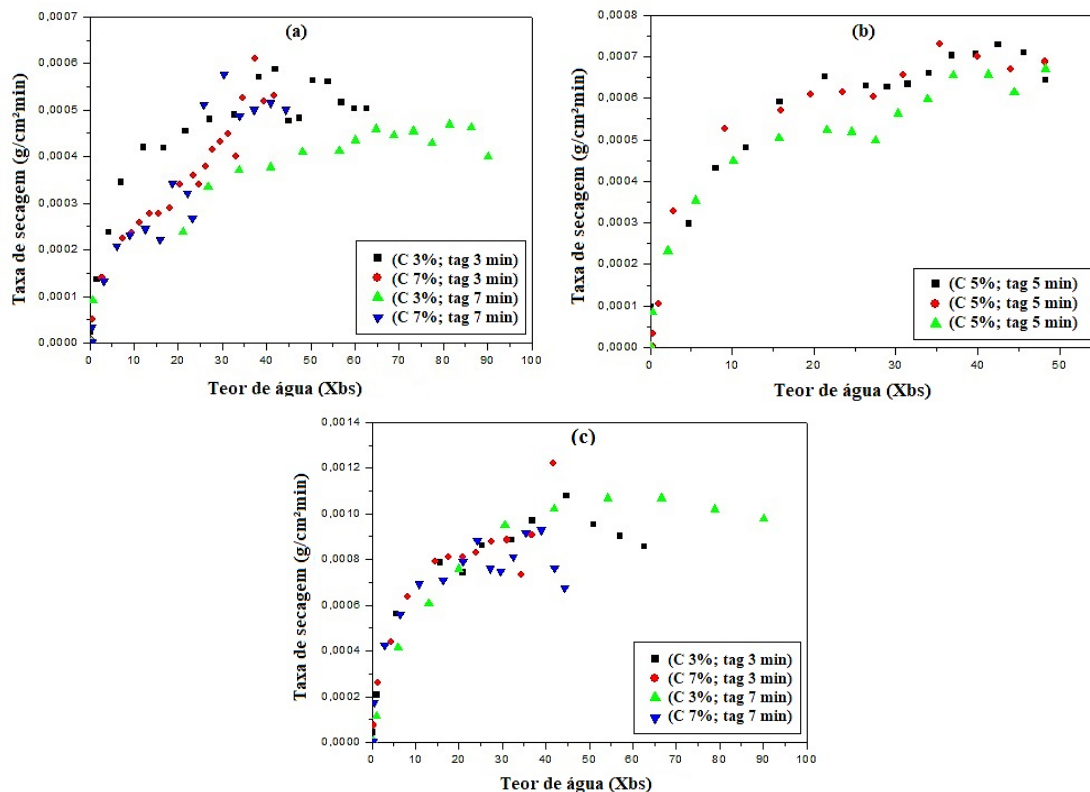


Figura 6. Curvas da taxa de secagem em função do teor de água (X_{bs}) a (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C

Outro fato que pode ser visualizado nas curvas é a presença de um curto período de taxa decrescente, entre a faixa 0,0 a 15 da umidade final, em contrapartida com a existência de um longo período de taxa constante ao decorrer do processo de secagem, entre a faixa de 15 a 90. Tal observação só confirma o comportamento anteriormente apresentado pelas curvas de cinética de secagem em camada de espuma de hortelã-de-folha-miúda. Conforme Martins *et al.* (2020), o estágio de taxa de secagem constante persiste até que a umidade no interior do sólido seja muito baixa, diminuindo a difusão da água para a superfície do sólido. O decréscimo na taxa de secagem observado em ambos os gráficos ocorre, pois, a quantidade de energia necessária para vaporizar a água neste período é menor, e o sólido passa a aumentar sua temperatura. Assim, a secagem avança até um limite, representado pelo teor de umidade de equilíbrio.

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi realizado utilizando como critério de seleção dos modelos a análise estatística, caso o modelo apresente coeficientes estatisticamente

significativos, além da verificação de ajuste satisfatório, através do coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (S), erro quadrático médio (MSE) e teste qui-quadrado (χ^2). Os resultados dos ajustes dos modelos não-lineares estão apresentados na Tabela 5 para cada uma das faixas de temperaturas trabalhadas na cinética de secagem. Os modelos se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais da secagem, apresentando coeficiente de determinação superiores a 0,9566 e função qui-quadrado com valores na ordem de 10^{-2} e 10^{-3} , o que indica boa precisão do modelo e alta correlação entre experimental e previsto (SANTOS *et al.*, 2022), com exceção do modelo de Midilli e Kucuk, que não apresentou coeficientes estatisticamente significativos ($p < 0,05$) para nenhuma das temperaturas estudadas, e o modelo de Page Modificado para a secagem à 70 °C.

Para as temperaturas de secagem de 50 e 60 °C, os modelos que possuíram melhor ajuste aos dados experimentais e menor erro padrão da estimativa foram os modelos de Page Modificado e Page. Diversos autores estudando a secagem em camada de espuma de caldo de cana (MARQUES,

Table 5. Adjustment of drying *Mentha crispa* foam drying kinetics models

Modelo	T (°C)	Parâmetro						
		k	n	a	R ²	S	MSE	χ ²
Page	50	0,0058399	1,23767		0,9866	0,3383	0,005703	0,00338
	60	0,0049887	1,40342		0,9866	0,2103	0,007279	0,00345
	70	0,008386	1,35365		0,9645	0,6408	0,01082	0,0089
Henderson & Pabis	50	0,01640		1,0518	0,9839	0,4074	0,006258	0,00407
	60	0,02455		1,07669	0,9797	0,3171	0,008939	0,00520
	70	0,03140		1,0724	0,9591	0,7356	0,01159	0,01022
Midilli & Kucuk	50				ns			
	60				ns			
	70				ns			
Newton	50	0,01535			0,9825	0,4423	0,00652	0,00438
	60	0,02251			0,9768	0,3615	0,009545	0,00583
	70	0,02903			0,9566	0,7801	0,01194	0,01069
Page Modificado	50	0,004486	1,2940	0,9772	0,9868	0,3345	0,005671	0,003379
	60	0,00342	1,4920	0,9687	0,9869	0,205	0,007195	0,003425
	70				ns			

ns = não significativo

2009), polpas de frutas (DANTAS, 2010), polpa de jaca (DANTAS *et al.*, 2008) e jambo vermelho (RIGUETO *et al.*, 2020), e secagem de carambola em secador de bandejas (SANTOS *et al.*, 2010), também verificaram melhores ajustes e coeficientes de determinação elevados para o modelo de Page.

Os ajustes para os modelos de Henderson & Pabis e Newton também foram satisfatórios e tiveram coeficientes de determinação superiores a 0,9768, mas apresentaram maiores valores de erro da estimativa, fato que pode ser explicado pela falta de ajuste aos dados experimentais no período final da secagem, próximo de atingir a umidade de equilíbrio, quando comparados aos outros dois modelos. A característica particular do comportamento das curvas de secagem da hortelã-da-folha-miúda obtidas com ausência de um período bem definido de taxa decrescente resultou num ajuste dos modelos com erros da estimativa relativamente elevados. O período de taxa constante é caracterizado pela igualdade entre a velocidade de transferência de massa no interior do sólido ou semi-líquido e a velocidade de evaporação de água na superfície do mesmo, acarretando em uma linearidade nas curvas de cinética de secagem.

Os resultados são compatíveis com os determinados por Silva *et al.* (2008), Jabs (2013) e Oliveira (2017), cujos coeficientes de determinação

foram mais elevados para a equação de Page quando comparados aos modelos de Henderson & Pabis e Newton. No estudo realizado por Silva (2015), dentre os modelos que apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, o modelo de Page foi selecionado para representar o fenômeno de secagem de polpa de maracujá em camada de espuma devido a sua simplicidade de aplicação e por ser, tradicionalmente, recomendado e aplicado para prever o fenômeno de secagem de diversos produtos agrícolas.

Para a temperatura de 70 °C, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou ao comportamento das curvas de secagem, contudo, observou-se que todos os modelos apresentados não se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais, possuindo coeficientes de determinação inferiores a 0,97 e valores de erro padrão da estimativa elevados. De maneira similar aos demais ajustes, o elevado erro padrão da estimativa pode ser atribuído ao comportamento das curvas de cinética de secagem, que apresentam uma significativa taxa constante e um quase imperceptível período de taxa decrescente, não se ajustando devidamente aos modelos matemáticos não-lineares.

As aplicações de modelos matemáticos para as curvas de secagem são importantes para descrever como a transferência de umidade ocorre no

interior do sólido para evaporar na sua superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo (Pereira, 2015). De acordo com Misra e Brooker (1980), o parâmetro k representa o efeito das condições externas de secagem, enquanto o parâmetro n representa a resistência interna do produto à secagem. Em todos os modelos avaliados, observa-se que o valor numérico de k é consideravelmente desprezível se comparado ao parâmetro n , demonstrando assim, que a secagem é um processo totalmente dependente da resistência interna do produto à secagem. Verifica-se que o parâmetro k aumentou com a elevação da temperatura de secagem para os modelos de Henderson & Pabis e Newton, comportamento também constatado para o modelo de Henderson & Pabis por Fernandes *et al.* (2013) ao trabalharem com a secagem da hortelã-da-folha-miúda em leito fixo (45, 55 e 65 °C) e por Kaya *et al.* (2007), na secagem de maçã (35, 45 e 55 °C).

Na análise estatística do processo, verificou-se que, para a resposta tempo de secagem, com exceção da temperatura de secagem, os outros parâmetros do modelo não foram estatisticamente significativos. A temperatura exerceu uma influência de sinal negativo sobre a variável resposta, de modo que quanto menor a temperatura for, maior será o tempo de secagem. A partir da análise estatística foi possível gerar um modelo, por intermédio de regressão linear dos dados experimentais do processo, com a variável de entrada que foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$). Esse modelo possuiu um coeficiente de determinação de 0,9395 ou percentagem de variação explicada de 93,95%, e pode ser representado pela Equação 18.

$$t_s = 176,364 - 122,57T \quad (18)$$

Ao realizar a análise de variância dos dados para a variável tempo de secagem observa-se

que o modelo representado é estatisticamente significativo, já que através do Teste F constata-se que o valor de $F_{\text{calculado}}$ é maior que o F_{tabelado} , $62,19 > 4,46$, considerando o nível de confiança e os graus de liberdade da regressão e do resíduo. Além disso, ainda com base no Teste F, observa-se que o modelo também não apresenta falta de ajuste, já que o mesmo teste também considera o nível de confiança e os graus de liberdade da falta de ajuste e do erro puro, revelando que o valor de $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{tabelado} , $0,0666 < 19,33$, o que caracteriza um modelo sem falta de ajuste.

Na Figura 7 são mostradas as superfícies de respostas que mostram a comparação entre as variáveis independentes do processo em relação a variável dependente tempo de secagem.

A influência do tempo de agitação sobre o tempo de secagem se mostrou mínima, entretanto, mesmo não sendo constatado efeito significativo da variável sobre a resposta, observou-se uma tendência de diminuição do tempo de secagem nos menores níveis do tempo de agitação. A concentração de agente espumante apresentou influência de sinal positivo, de modo que, à medida que seus níveis aumentem, os valores do tempo de secagem também aumentam. Sendo assim, é possível constatar que a operação de secagem deva ser realizada nos seus valores mínimos, o que promoveria uma redução dos custos de produção.

Analisando o teor de água, verificou-se que, com exceção da concentração de emulsificante e das interações envolvendo a temperatura de secagem, os demais parâmetros do modelo foram significativos. Nota-se que a temperatura exerce uma influência de sinal negativo sobre a variável resposta, de modo que quanto menor a temperatura,

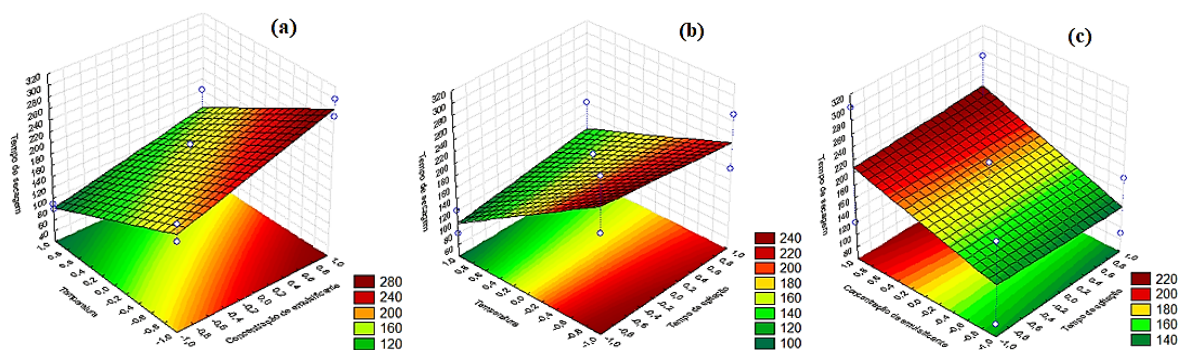


Figura 7. Superfícies de resposta para a variável tempo de secagem, mantendo fixo nos níveis médios: a) tempo de agitação; b) concentração de agente espumante; c) temperatura

maior será o teor de água, enquanto o tempo de agitação exerce uma influência de sinal positivo sobre a variável resposta, de modo que quanto maior ele for, mais elevado será o teor de água.

A partir da análise estatística foi possível obter um modelo, por intermédio de regressão linear dos dados experimentais do processo de secagem, com as variáveis de entrada e a interação que foram estatisticamente significativas ($p < 0,05$). Esse modelo possuiu um coeficiente de determinação de 0,7049, ou percentagem de variação explicada de 70,49%, e um erro padrão de 0,0007182, e pode ser representado pela Equação 19.

$$X_{bs} = 0,144707 + 0,153443T_{ag} - 0,094878T - 0,096533T_{ag}C \quad (19)$$

Ao realizar a análise de variância dos dados para a variável teor de água observa-se que o modelo representado é estatisticamente significativo, já que através do Teste F constata-se que o valor de $F_{\text{calculado}}$ é maior que o F_{tabelado} , $5,57 > 4,35$, considerando o nível de confiança e os graus de liberdade da regressão e do resíduo. Ainda com base no Teste F, foi observado que o modelo não apresenta falta de ajuste, já que o mesmo teste também considera o nível de confiança e os graus de liberdade da falta de ajuste e do erro puro, revelando que o valor de $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{tabelado} , $10,25 < 19,30$. Entretanto, devido ao baixo valor do coeficiente de determinação (R^2), deve-se concluir que existe uma falta de ajuste.

Na Figura 8 são mostradas as superfícies de respostas que mostram a comparação entre as variáveis independentes do processo em relação a variável dependente teor de água. Ao analisar a Figura 8a, observa-se uma maior dependência do teor de água com a temperatura de secagem, de modo que em toda a faixa de trabalho da concentração não houve variação significativa

do teor de água. Percebe-se que os menores teores de água do produto encontram-se no nível superior da temperatura e inferior da concentração. Tal observação fornece a informação de que a variável concentração de emulsificante pode ser utilizada em seus menores níveis sem que haja comprometimento da operação de secagem e da qualidade do produto final.

Na Figura 8c verifica-se a influência da interação entre as duas variáveis independentes sobre a resposta, além de uma demonstração de maior dependência da umidade final com o tempo de agitação, observada através da variação ao longo de sua faixa de trabalho. Ambas as variáveis exercem uma influência de sinal positivo, de modo que os menores teores de água se encontram nos menores níveis do tempo de agitação e da concentração de emulsificante. A partir dos resultados de superfícies de resposta para umidade final observa-se que a influência de sinal positivo do tempo de agitação pode ter ocasionado um mascaramento dos resultados de estimativa de efeito das demais variáveis. É possível sugerir que os maiores tempos de agitação deixaram o filme interfacial da espuma mecanicamente frágil, de modo que a estabilidade das bolhas de ar em sua estrutura foram comprometidas e prejudicaram a retirada de umidade através da capilaridade dos poros durante a secagem.

CONCLUSÕES

- A densidade, percentual de expansão, capacidade de incorporação de ar e estabilidade da espuma de hortelã-da-folha-miúda apresentam dependência apenas da concentração do agente espumante, dado que

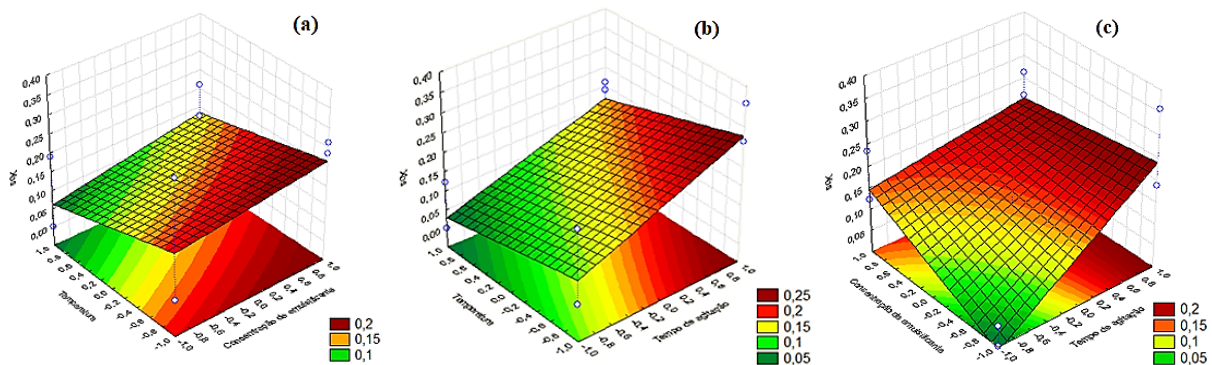


Figura 8. Superfícies de resposta para a variável teor de água em base seca, mantendo fixo nos níveis médios: a) tempo de agitação; b) concentração de agente espumante; c) temperatura

o tempo de agitação não possuiu influência significativa nas condições estudadas.

- A elevação da temperatura reduz significativamente o tempo de secagem e o teor de água da espuma de hortelã-da-folha-miúda. As curvas de cinética e taxa de secagem possuem um comportamento com presença de longo período de taxa constante e quase inexistência de taxa decrescente. Os modelos matemáticos não lineares de Page, Page Modificado, Newton e Henderson & Pabis apresentam coeficientes estatisticamente significativos, sendo o modelo Page o que melhor se ajusta aos dados experimentais e, portanto, o mais indicado para representar o fenômeno de secagem em camada de espuma da *Mentha crispa*.
- A melhor condição de secagem ocorre ao se trabalhar com temperatura de 70 °C, 3% de concentração de agente espumante e tempo de agitação de 3 min, obtendo-se um tempo de secagem de 80 min e teor de água de 0,9%.

DECLARAÇÃO DE CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

LEITE, A.C.N.: Análise Formal, Investigação, Metodologia, Redação – versão original, Redação – revisão & edição; **CAVALCANTE, J.A.:** Conceituação, Metodologia, Supervisão, Validação, Redação – versão original; **COSTA, N.A.:** Conceptualização, Análise Formal, Software, Supervisão, Validação; **PINHEIRO, W.S.:** Análise Formal, Investigação.

DECLARAÇÃO DE INTERESSES

Os autores declaram que não têm interesses financeiros concorrentes conhecidos ou relacionamentos pessoais que possam parecer influenciar o trabalho relatado neste artigo.

REFERÊNCIAS

BAG, S. K.; SRIVASTAY, P. P.; MISHRA, H. N. Optimization of Process Parameters for Foaming of Bael (*Aegle marmelos* L.) Fruit Pulp. **Food Bioprocess Techno**, v. 4, p. 1450-1458, 2011.

BALDI, E.; TEIXEIRA, L.; CUNHA, V. G.; TOMBINI, C.; BARICHELLO, R.; LUZ, G. L.; LAJÚS, C. R.; MACHADO JUNIOR, F. R. S.; DALCATON, F. Análise do efeito da temperatura e do tratamento osmótico na desidratação de fatias de abacaxi. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, e415101220157, 2021.

BENABDALLAH, A.; CHAABANE, R.; MAHIEDDINE, B.; OUMAYAMA, A.; CHOKRI, M. Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of Six Wild *Mentha* Species (*Lamiaceae*) from Northeast of Algeria. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v. 6, n. 9, p.760-766, 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução de Diretoria Colegiada - RDC nº 218**, de 29 de julho de 2005. Dispõe sobre o Regulamento Técnico de Procedimentos Higiênico-Sanitários para Manipulação de Alimentos e Bebidas Preparados com Vegetais. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde (MS). Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. **Práticas integrativas e complementares: plantas medicinais e fitoterapia na Atenção Básica**. Brasília: Ministério da Saúde, 2012. 156 p. – (Série A. Normas e Manuais Técnicos) (Cadernos de Atenção Básica; n. 31).

BROCK, J.; NOGUEIRA, M. R.; ZAKRZEWSKI, C.; CORAZZA, F. C.; CORAZZA, M. L.; OLIVEIRA, J. V. Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 3, p. 564-570, 2008.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport. The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

COELHO, B. E. S.; SÁ, C. H.; SILVA, L. F. M.; SOUSA, K. S. M.; MACHADO, N. S. Ajuste de modelos matemáticos a curva de secagem da banana cv. Terra com uso de energia solar térmica sob exposição direta. **Revista Craibeiras de Agroecologia**, v. 4, n. 1, e7688, 2019.

- CRUZ, W. F. **Obtenção de polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó pelo método de secagem em camada de espuma**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- DANTAS, H. J.; SILVA, A. S.; LIMA, E. E.; FARIAS, P. A.; ANDRADE, M. A. Obtenção da polpa de jaca em pó pelo método de secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*). **III Jornada Nacional da Agroindústria**, Bananeiras, Paraíba. 2008.
- DANTAS, S. C. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método *foam-mat***. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- DE SOUSA, D. P.; LIMA; LIMA, T. C.; STEVERDING, D. Evaluation of Antiparasitic Activity of *Mentha Crispa* Essential Oil, Its Major Constituent Rotundifolone and Analogues against *Trypanosoma Brucei*. **Planta Medica**, v. 82, n. 15, p. 1346-1350, 2016.
- DESCHAMPS, C.; ZANATTA, J.L.; BIZZO, H.R.; OLIVEIRA, M.C.; ROSWALKA, L.C. Avaliação sazonal do rendimento de óleo essencial em espécies de menta. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 725-730, 2008.
- FEITOSA, R. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; LIMA, F. C. S.; OLIVEIRA, E. N. A. Drying and characterization of myrtle pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 12, p. 858-864, 2017.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 2º Ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.
- FERNANDES, T. K. S.; PÊ, P. R.; ROCHA, A. P. T. Comportamento da secagem da hortelã da folha miúda. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 2, p. 36-40, 2013.
- GALLO, L.; PIÑA, J.; BUCALÁ, V.; ALLEMANDI, D.; RAMÍREZ-RIGO, M. V. Development of a modified-release hydrophilic matrix system of a plant extract based on co-spray-dried powders. **Powder Technology**, v. 241, p. 252-262, 2013.
- GASPARIN, P. P.; CHRIST, D.; COELHO, S. R. M. Secagem de folhas *Mentha piperita* em leito fixo utilizando diferentes temperaturas e velocidades de ar. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 2, p. 242-250, 2017.
- GUERRA, P. M.; NODARI, O. R. **Biodiversidade: aspectos biológicos, geográficos, legais e éticos**. (3. ed.) Porto Alegre: UFRGS; Florianópolis: UFSC, 2001.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.
- JABS, D. **Estudo da temperatura de secagem do okara (resíduo do extrato aquoso de soja), caracterização e avaliação do produto como complemento nutricional**. 2013. Monografia (Curso de Tecnologia em Processos Químicos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2013.
- KANDASAMY, P.; VARADHARAJU, N.; KALEMULLAH, S.; MOITRA, S. Production of papaya powder under foam-mat drying using methyl cellulose as foaming agent. **Asian Journal of Food and Agro-Industry**, v. 5, n. 5, p. 374-387, 2012.
- KARIM, A. A.; CHEEWAI, C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) purée: Stability and air drying characteristics. **Food Chemistry**, v. 64, p. 337-343, 1999.
- KAYA, A.; AYDIN, O.; DEMIRTAS, C. Drying kinetics of red delicious apple. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 4, 517-524, 2007.
- KUDRA, T.; RATTI, C. Foam-mat drying: Energy and cost analyses. **Canadian Biosystems Engineering**, v. 48, p. 3.27-3.32, 2006.

- MALANKINA, E. L.; TKACHEVA, E. N.; KUZMENKO, A. N.; ZAYCHIK, B. T.; RUZHITSKIY, A. O.; EVGRAFOVA, S. L. Some Specific Features of The Biochemical Composition of the Raw Material of Mint (*Mentha Spicata* Var. *Crispa* L.). **Moscow University Chemistry Bulletin**, v. 77, n. 6, p. 342-346, 2022.
- MANGUEIRA, E. R.; CAVALCANTE, J. A.; COSTA, N. A.; LIMA, A. G. B. Foam-mat drying process of duck egg white. **Diffusion foundations**, v. 25, p. 54-82, 2020.
- MARQUES, G. M. R. **Secagem de caldo de cana em leito de espuma e avaliação sensorial do produto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2009.
- MARTINS, F. P.; BOSCH NETO, J. C.; SILVA, A. J. O.; SIQUEIRA, M. O. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, 2020.
- MATOS, F. J. A. **Farmácias Vivas: Sistema de utilização de plantas medicinais projetado para pequenas comunidades**. (4. ed. rev. e ampl.) Fortaleza: UFC, 2002. 267p.
- MATOS, J. D.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; MORAES, M. S.; SILVA, S. N.; SILVA, L. P. F. R. Foam mat drying kinetics of jambolan and acerola mixed pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.26, n.7, p.502-512, 2022.
- MEI LING, N.; SULAIMAN, R. Development of Beetroot (*Beta Vulgaris*) Powder Using Foam Mat Drying. **Food Science & Technology**, v. 88, p. 80-86, 2018.
- MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 12, n. 8, p. 1.254-1.260, 1980.
- MOHAMED, A. A.; ISMAIL-FITRY, M. R.; ROZZAMRI, A.; BAKAR, J. Effect of Foammat Drying on Kinetics and Physical Properties of Japanese Threadfin Bream (*Nemipterus Japonicus*) Powder. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 3, 2022.
- MOREIRA, M. F.; CAVALCANTE, J. A.; COSTA, N. A.; SILVA, M. F. R. Obtenção do pó da entrecasca do Juazeiro (*Ziziphus joazeiro* Mart.) por secagem em camada de espuma. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, e558101220656, 2021.
- OLIVEIRA, R. F. **Estudo da secagem em camada de espuma do sangue bovino**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- OLIVEIRA, B. F.; NEGREIROS, J. K. S.; BONFIM, K. S.; CAVALCANTE, J. A.; PINTO, M. F.; COSTA, N. A. Modelagem matemática da cinética de secagem em camada de espuma da folha da gravioleira (*Annona muricata* Linn) e caracterização do pó obtido. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, e10942811, 2020.
- ONWUDE, D. I; HASHIM, N.; JANIUS, R. B.; NAWI, N. M.; ABDAN, K. Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, p. 599-618, 2016.
- PACHÚ, C. O. **Processamento de plantas medicinais para obtenção de extratos secos e líquidos**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: Fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.
- PEREIRA, T. S. **Estudo da secagem da clara do ovo em camada de espuma (foam-mat drying)**. Pombal, 76 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Agroindustriais - Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2015.
- RIGUETO, T.; VINICIUS, C.; EVARISTO, L. M.; GERALDI, C. A. Q.; COVRE, L. Influência da temperatura de secagem de uvaia (*Eugenia Pycnanthus*) em camada de espuma. **Engevista**, v. 20, n. 4, p. 537, 2018.

- RIGUETO, C. V. T.; NAZARI, M. T.; EVARISTO, L. M.; ROSSETTO, M.; DETTMER, A.; GERALDI, C. A. Q.; PICCIN, J. S. Influência da temperatura de secagem de jambo vermelho (*Syzygium malaccense*) em camada de espuma. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, e40932382, 2020.
- SANTOS, C. T.; BONOMO, R. F.; CHAVES, M. A.; FONTAN, R. C. I.; BONOMO, P. Cinética e modelagem da secagem de carambola (*Averrhoa carambola* L.) em secador de bandeja. **Acta Scientiarum Technology**, 32 (3), 309-313, 2010.
- SANTOS, N. C.; ALMEIDA, R. L. J.; MEDEIROS, M. F. D.; HOSKIN, R. T.; PEDRINI, M. R. S. Foaming characteristics and impact of ethanol pretreatment in drying behavior and physical characteristics for avocado pulp powder obtained by foam mat drying. **Journal of Food Science**, v. 87, p. 1780–1795, 2022.
- SAUTER, E. A.; MONTOURE, J. E. The relationship of lysosyme content of egg white to volume and stability of foams. **Journal of Food Science**, v. 37, n. 6, p. 918-920, 1972.
- SHEKARCHI, M.; HAJIMEHDIPOOR, H.; SAEIDNIA, S.; GOHARI, A. R.; HAMEDANI, M. P. Comparative study of rosmarinic acid content in some plants of Labiatae family. **Pharmacognosy Magazine**, v. 8, n. 29, p. 37-41, 2012.
- SILVA, A. S.; GURJÃO, K. C.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, R. L.A.; PEREIRA, W. E. Dehydration of tamarind pulp through the foam-mat drying method. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1899-1905, 2008.
- SILVA, R. L. G. **Desidratação de polpa de maracujá azedo em leito de espuma**. 2015. Monografia (Curso de Engenharia Agrônoma) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, 2015.
- SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assisat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733-3740, 2016.
- SILVA, A. de S.; PEDRO, M. A. M. Estudo da influência da desidratação osmótica na secagem de fatias de abacaxi. **Revista Científica**, v. 1, n. 1, 2018.
- SILVA, P. B. **Secagem da folha da amoreira negra (*Morus nigra* L.) pelo método de camada de espuma (foam mat drying)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- SILVA FILHO, E. D.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; GUIMARÃES, M. K. A. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa da manga cv. Haden. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 3, p. 354-361, 2016.
- SOUZA, L. M. R.; CANUTO, M. F. C. S.; SILVA, D. R. S.; FARIAS, F. P. M.; SANTOS, F. S. Secagem da polpa do umbu (*Spondias tuberosa*) em camada de espuma. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, e488101119955, 2021.
- SUSANTI, D.Y.; WAHYUDI, B. S.; MOHAMMAD, F.; MUSLIKHIN, H. Foam-mat Drying in the Encapsulation of Red Sorghum Extract: Effects of Xanthan Gum Addition on Foam Properties and Drying Kinetics. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 20, n. 4, p. 270-279, 2021.
- THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 573-583, 2008.
- TURKEZ, H.; TOZLU, O. O.; LIMA, T. C.; BRITO, A. E. M.; SOUSA, D. P. A Comparative Evaluation of the Cytotoxic and Antioxidant Activity of *Mentha Crispa* Essential Oil, Its Major Constituent Rotundifolone, and Analogues on Human Glioblastoma. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, 2083923-12, 2018.
- VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. J. **Food dehydration**. Westport, Connecticut: The Avi Publishing Company, v. 2, 721 p., 1964.
- ZEMIANI, A.; BOLDARINI, M. T. B.; ANAMI, M. H.; DE OLIVEIRA, E. F.; DA SILVA, A. F. Tolerance of *Mentha Crispa* L. (garden Mint) Cultivated in Cadmium-contaminated Oxisol. **Environmental Science and Pollution Research International**, v.28, n. 31, p. 42107-42120, 2021.