

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

WILMA KARLA VASCONCELOS DA SILVA

SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DA FOLHA DO ESPINAFRE
*(**Tetragonia tetragonoídes L.**)*

JOÃO PESSOA – PB

2024

WILMA KARLA VASCONCELOS DA SILVA

SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DA FOLHA DO ESPINAFRE

(Tetragonia tetragonoïdes L.)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientador (a): Josilene de Assis Cavalcante
Coorientador: Nagel Alves Costa

JOÃO PESSOA – PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586s Silva, Wilma Karla Vasconcelos da.

Secagem em camada de espuma do espinafre (*Tetragonia tetragonoïdes* L.) / Wilma Karla Vasconcelos da Silva. - João Pessoa, 2024.

97 f. : il.

Orientação: Josilene de Assis Cavalcante.

Coorientação: Nagel Alves da Costa.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Tempo de secagem. 2. Modelos matemáticos. 3. Atividade de água. 4. Compostos fenólicos. I. Cavalcante, Josilene de Assis. II. Costa, Nagel Alves da. III. Título.

UFPB/BC

CDU 66.047(043)

WILMA KARLA VASCONCELOS DA SILVA

SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DA FOLHA DO ESPINAFRE

(Tetragonia tetragonoides L.)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em 30 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
JOSILENE DE ASSIS CAVALCANTE
Data: 31/08/2024 07:30:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dra. Josilene de Assis Cavalcante – PPGEQ/CT/UFPB
(Orientadora)



Documento assinado digitalmente
NAGEL ALVES COSTA
Data: 31/08/2024 07:34:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Nagel Alves Costa – PPGEQ/CT/UFPB
(Coorientador)



Documento assinado digitalmente
MERCIA MELO DE ALMEIDA MOTA
Data: 31/08/2024 21:02:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Mércia Melo Almeida Mota – UAEEA/CTRN/UFCG
(Examinadora Externa)



Documento assinado digitalmente
JOSE ETIMOGENES DUARTE VIEIRA SEGUNDO
Data: 31/08/2024 10:32:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Etimógenes Duarte Vieira Segundo – PPGEQ /CT/UFPB
(Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir chegar até aqui, pela presença constante na minha vida, por me dar força, sabedoria e coragem em todos os momentos e não ter permitido, eu desistir. Gratidão eterna!

Aos meus pais, Vânia e Lindreval, pelo amor, estímulo e esforço durante a jornada desta pesquisa e sempre que precisei, aos meus irmãos, Willames e Wellington por todo apoio e incentivo e a minha prima irmã Mayara Carla, pelo companheirismo, empatia e acolhimento.

Ao meu filho, Abraão, por todo amor, compreensão e por ser minha maior motivação. És benção na minha vida.

À minha orientadora, Profa. Josilene Cavalcante, pela paciência, confiança, incentivo e conhecimentos compartilhados e ao meu coorientador Prof. Nagel Alves por todo apoio, disponibilidade, paciência e ensinamentos extremamente importantes para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores do PPGEQ, em especial, ao Prof. Flávio Honorato, pelo encorajamento, compreensão e empatia durante o momento mais crítico dessa jornada, a quem sou eternamente grata e ao secretário do PPGEQ, Fabrício, pela ajuda e acolhimento.

Às Professoras Marta Madruga, Antônia Lúcia, Elieidy Gomes pela colaboração (com reagentes) e à Profa. Joselma Amorim, pelo apoio, amizade e incentivo.

À turma de mestrado, em especial a Ynis, Wanderson, Moisés, Ruan e Izabela pelo companheirismo, incentivo e por todo amparo, tornando os dias mais leves ao longo dessa jornada, às alunas do Doutorado Ana Carolina e Paloma, aos alunos da graduação de Engenharia Química Vike, Vitor, Fernanda e Martha por toda ajuda, conhecimentos compartilhados, disponibilidade e paciência e em especial, a amiga Quissi Alves pelas orações e torcida.

Aos amigos e técnicos de laboratório, Francisco, Rafael, Débora, Josevan, Lucas, Riva, Fábio, Sófacles, Vanessa e Thayze por todo acolhimento, disponibilidade, ajuda na condução das análises e pelos momentos de descontração, em especial, a Clediana e Fabiana pelo cuidado, por me amparar nos momentos de dificuldades e pelas ideias de melhoria deste estudo, sempre solícitas no que fosse preciso. Vocês foram essenciais nesta conquista. Muito obrigado!!

Aos técnicos do LTA (Diogénes, Adriana, Leda e Túlio), LAQA (Leila), CTDR (Ângela e Hebert) e Clóvis pela ajuda e apoio durante as análises.

À CAPES, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste estudo.

À banca examinadora pelo aceite e pelas valiosas contribuições.

Porque há esperança para a árvore, pois mesmo cortada, voltará a brotar, e não cessarão os seus rebentos. Se as suas raízes envelhecerem na terra, e o seu tronco morrer no chão, ao cheiro das águas brotará e dará ramos como planta nova.

Jó 14: 7-9.

RESUMO

O espinafre é uma hortaliça com alto valor nutricional, por ser rico em fibras, vitaminas e minerais. Contém compostos antioxidantes como vitamina C, compostos fenólicos e carotenoides, o que auxilia na manutenção da saúde e na prevenção de doenças crônicas. Devido à alta perecibilidade necessita de um método de conservação, como a secagem, a fim de reduzir o teor de água, manter a estabilidade do produto e prolongar sua vida útil. O objetivo deste trabalho foi obter o pó da folha do espinafre pela secagem em camada de espuma. A espuma obtida a partir das folhas de espinafre adicionado do emulsificante Portogel foi caracterizada quanto a parâmetros: densidade, percentual de expansão, incorporação de ar, estabilidade, acidez total titulável, pH e umidade. A secagem foi realizada de acordo com um planejamento experimental fatorial de $2^3 + 3$ pontos centrais, no qual as variáveis independentes foram: concentração de emulsificante (2, 3 e 4%), tempo de agitação (6, 7 e 8 min) e temperatura (50, 60 e 70 °C) e as variáveis dependentes (tempo de secagem e teor de umidade). Os dados da cinética de secagem foram submetidos ao ajuste matemático utilizando os modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Logarítmico e Midilli. Os pós obtidos da folha de espinafre foram caracterizados quanto aos parâmetros: pH; sólidos solúveis totais (SST); acidez total titulável (ATT); atividade de água (A_w); umidade; cinzas; proteínas; lipídios; carboidratos; cor e compostos fenólicos totais (CFT). Pelos resultados obtidos para a secagem constatou-se que a temperatura foi a variável que apresentou influência estatisticamente significativa no intervalo de confiança 95% sobre o tempo final de secagem e que o modelo de Page modificado foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. E para os pós obtidos verificou-se que: apresentaram caráter pouco ácido, com elevação do teor de acidez após a secagem; alto teor de sólidos solúveis variando de 36 a 44 °Brix; a atividade de água ($< 0,6$) e a umidade de acordo com o preconizado pela legislação ($\leq 15\%$), favorecendo a conservação e o armazenamento; teor de compostos fenólicos significativos (1457,81 a 2056,88 mg EAG 100 g^{-1}); coloração verde, variando para tons mais escuros ao elevar a temperatura de secagem de 50 para 70 °C; os teores de proteínas, lipídios, cinzas e carboidratos foram concentrados após a secagem. Desse modo, concluiu-se que o pó da folha do espinafre obtido por camada de espuma se mostra promissor para aplicação em novas formulações nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Além disso, a secagem em camada de espuma é um processo rápido e viável para a obtenção do pó da folha de espinafre.

Palavras-chave: Tempo de secagem; modelos matemáticos; atividade de água; compostos fenólicos.

ABSTRACT

Spinach is a vegetable with high nutritional value, as it is rich in fiber, vitamins and minerals. It contains antioxidant compounds such as vitamin C, phenolic compounds and carotenoids, which help maintain health and prevent chronic diseases. Due to its high perishability, it requires a preservation method, such as drying, in order to reduce water content, maintain product stability and extend its shelf life. The objective of this study was to obtain spinach leaf powder by drying in a foam layer. The foam obtained from spinach leaves added with the emulsifier Portogel was characterized according to the following parameters: density, expansion percentage, air incorporation, stability, total titratable acidity, pH and moisture. Drying was performed according to a $2^3 + 3$ central points factorial experimental design, in which the independent variables were: emulsifier concentration (2, 3 and 4%), stirring time (6, 7 and 8 min) and temperature (50, 60 and 70 °C) and the dependent variables (drying time and moisture content). The drying kinetics data were subjected to mathematical adjustment using the Newton, Page, modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic and Midilli models. The powders obtained from spinach leaves were characterized according to the following parameters: pH; total soluble solids (TSS); total titratable acidity (TTA); water activity (A_w); moisture; ash; proteins; lipids; carbohydrates; color and total phenolic compounds (TPC). From the results obtained for drying, it was found that temperature was the variable that presented a statistically significant influence on the 95% confidence interval on the final drying time and that the modified Page model was the one that presented the best fit to the experimental data. And for the powders obtained, it was found that: they presented a slightly acidic character, with an increase in the acidity content after drying; high content of soluble solids ranging from 36 to 44 °Brix; water activity (< 0.6) and moisture in accordance with the recommendations of the legislation ($\leq 15\%$), favoring conservation and storage; significant content of phenolic compounds (1457.81 to 2056.88 mg EAG 100 g⁻¹); green coloration, varying to darker tones when increasing the drying temperature from 50 to 70 °C; the contents of proteins, lipids, ash and carbohydrates were concentrated after drying. Thus, it was concluded that the spinach leaf powder obtained by foam layer shows promise for application in new formulations in the food and pharmaceutical industries. In addition, foam layer drying is a fast and viable process for obtaining spinach leaf powder.

Keywords: Drying time; mathematical models; water activity; phenolic compounds.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	09
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1 HORTALIÇAS	12
3.2 ESPINAFRE	13
3.3 SECAGEM	15
3.3.1 Secagem em camada de espuma	16
3.3.2 Cinética de secagem	18
3.3.3 Modelos matemáticos para secagem	20
4. METODOLOGIA	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 ARTIGO 1: CINÉTICA DE SECAGEM DO ESPINAFRE EM CAMADA DE ESPUMA E AJUSTES MATEMÁTICOS	29
5.2 ARTIGO 2: CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DA FOLHA DE ESPINAFRE OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA	66
6. CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICES	92

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem índices elevados de desperdícios de alimentos, cerca de 30%, ocupando 10º lugar no ranking de países que mais perdem alimentos no mundo (SANTOS et al., 2020) e de acordo com os dados da Associação Brasileira de Supermercados (ABRAS), as hortaliças folhosas ocupam o 4º lugar de alimentos mais desperdiçados, pelos supermercados, em termos de volume (BRASIL, 2022).

As hortaliças possuem grande importância nutricional para alimentação humana, por serem fontes de fibras, vitaminas e sais minerais (ANTUNES, 2024). O consumo regular destes alimentos é capaz de proteger as células contra danos oxidativos, inibir a síntese de substâncias inflamatórias (DEFRAEYER, 2017; RODRIGUES, 2021), melhorar o estado de saúde e o bem-estar e/ou reduzir o risco de doenças (CARVALHO, 2006).

O espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L.) é uma hortaliça folhosa, de cor verde escura e folhas triangulares, pertencente à família *Aizoaceae*. Conhecido também como espinafre Nova Zelândia, espécie mais consumida no Brasil, com plantio de 1.741 hectares (LANA e TAVARES, 2010; VILELA e LUENGO, 2017). Rico em fibras, minerais (K, Mg, Mn, Ca, P e Fe), vitaminas (A, C e K) e compostos bioativos (carotenoídes, tocofenóis e fenólicos), tem um elevado valor nutracêutico (nutricional e funcional) e é particularmente indicado para pessoas com anemia e desnutrição (Di Fan et al., 2011; LANA e TAVARES, 2010; ROBALO, 2021).

Devido ao alto teor de água presente em suas folhas, perdas significativas acontecem pós colheita e favorece a proliferação de microrganismos e as reações enzimáticas que podem provocar sua deterioração e redução da sua vida útil (BIANCO, 2015), por isso a produção de pós, torna-se uma alternativa viável e amplamente empregada para conservação de hortaliças, gerando insumos para diversas indústrias como por exemplo a alimentícia, a agroquímica e a farmacêutica. E a secagem é um dos processos mais utilizados para aumentar a vida útil destes produtos (TELES et al., 2016).

Dentre os tipos de secagem, tem-se a secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) técnica em que alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em espumas estáveis através de vigorosa agitação e incorporação de agentes espumantes para, posteriormente, serem desidratados (SILVA et al., 2008).

O processo de secagem em camada de espuma é considerado mais simples e barato em comparação a outros métodos, como a liofilização e o *spray drying*. Apresenta vantagens

como a utilização de baixas temperaturas e tempos mais curtos de secagem, sendo esses benefícios atribuídos a maior área de superfície exposta ao ar de secagem, acelerando assim o processo de retirada de umidade (FRANCO et al., 2015; SANGAMITHRA et al., 2014).

Diante do exposto, o uso do espinafre em pó para formulação de alimentos industrializados e uso doméstico se constitui em uma alternativa para aumentar o consumo desse vegetal nutracêutico e estender o seu tempo de comercialização.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Obter o pó da folha do espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L.) utilizando a técnica de secagem em camada de espuma.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir parâmetros operacionais para produção da espuma e secagem da mesma.
- Produzir e caracterizar a espuma da folha de espinafre em termos de densidade, expansão, capacidade de incorporação de ar e estabilidade, acidez total titulável, pH e umidade.
- Estudar a cinética de secagem do espinafre, em leito de espuma, baseado no planejamento experimental fatorial completo $2^3 + 3$ pontos centrais (11 experimentos) e avaliar a influência das variáveis de entrada (concentração do agente espumante; temperatura de secagem; tempo de agitação) sobre a resposta (tempo de secagem; umidade final em base seca).
- Realizar o ajuste das curvas de secagem obtidas a partir de modelos matemáticos.
- Caracterizar o pó da folha de espinafre quanto aos parâmetros: pH; sólidos solúveis totais; acidez total titulável; atividade de água; umidade; cinzas; proteínas; lipídios; carboidratos; cor e compostos fenólicos totais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 HORTALIÇAS

O consumo de frutas e hortaliças tem aumentado em todo mundo em função da sociedade moderna buscar a cada dia hábitos de vida mais saudáveis e naturais. Além disso, a conveniência e a praticidade na hora de comprar e consumir frutas e hortaliças tem levado consumidores a demandar produtos prontos para consumo ou que exigem pouco ou nenhum preparo para serem consumidos com segurança (OLIVEIRA & SANTOS, 2015).

A perda pós-colheita de hortaliças é elevada e potencializada com manipulação e conservação inadequadas. Para reduzir esse prejuízo e manter os atributos mais próximos possíveis ao alimento *in natura* são importantes técnicas de conservação. Estas, em folhosas, tendem a assegurar a qualidade do produto final, podem gerar menor descarte (BARBOSA, FINGER e CASALI, 2015) e são utilizadas para diversos alimentos (ROCHA et al., 2008; SANTOS FILHO et al., 2018).

As hortaliças caracterizam-se pelo alto teor inicial de água, por isso sua alta perecibilidade. Diante disso, a secagem possibilita a diminuição do teor de água e contribui para o aumento da vida de prateleira, uma vez que a umidade é reduzida a níveis que dificultam a deterioração, mantém sua estabilidade e favorece o armazenamento e o transporte (RONCHETI, 2014).

As hortaliças desidratadas dão origem a inúmeros produtos, alguns deles de elevado consumo no Brasil como sopas e pós desidratados. A desidratação de hortaliças proporciona, além de baixo custo, produtos que conservam, com pouca alteração, suas características organolépticas e nutritivas (MOTA, 2005; BEZERRA, 2007).

Os pós alimentícios, obtidos pela desidratação de hortaliças, são cada vez mais utilizados pela indústria de alimentos em decorrência dos baixos custos com a embalagem, transporte, estocagem e conservação, aumentando ainda seu valor agregado (BEZERRA, 2007).

3.2 ESPINAFRE

O espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L.) é uma hortaliça que possui folhas triangulares de coloração verde-escuro, pertencente à família *Aizoaceae*, também conhecida como “Nova Zelândia” (Figura 3.1), variedade encontrada com mais facilidade no mercado brasileiro (LANA & TAVARES, 2010).

Figura 3.1 - Folhas de espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L.)



É uma planta herbácea, de hábito rasteiro, com caule principal, ereto e curto, de onde são originados seis ou mais ramos laterais, radiais, que crescem horizontalmente. É cultivado o ano todo em faixa termo-climática, produzido em temperaturas cálidas ou amenas, não recomendada para invernos frios de regiões de altitude (BISCARO et al., 2011).

Segundo Biscaro et al. (2013) e Lana e Tavares (2010) o espinafre teve um aumento significativo no consumo por possuir um preço bastante acessível e ser rico em nutrientes, destacando-se como fonte de magnésio, manganês potássio, zinco e vitaminas B2 (riboflavina) e B9 (ácido fólico), indicado para pessoas com anemia e desnutrição, por ser rico em ferro e uma excelente fonte de vitamina A e B2.

Pode ser consumido cru ou cozido, em saladas, para enriquecer o valor nutricional e o sabor de suflês, omeletes, recheios de massas e molhos para carnes. O espinafre Nova Zelândia tem pouquíssimas calorias 23 kcal/100 g (*in natura*). Possui um elevado teor de água presente 94%, e 2,1 g/100g de fibras, que corresponde a 8,4% da dose diária recomendada para um adulto saudável. Destaca-se a baixa concentração de lipídeos e açúcares, característica que faz do espinafre um alimento diurético, muito presente em dietas mais saudáveis (ROBALO, 2021; TACO, 2011).

O consumo de espinafre beneficia a saúde humana, pois ao melhorar o estado nutricional, ajuda a prevenir a ocorrência de determinadas patologias tais como a obesidade, a hiperglicemia e doenças cardiovasculares (ROBALO, 2021).

A Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2011), elaborada pelo Núcleo de Estudos e Pesquisa em Alimentação (NEPA), fornece a composição de macro e micronutrientes do espinafre natural (*Tetragonia tetragonoides* L.), a qual está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição centesimal do espinafre cru por 100 g de parte comestível

Componentes	Quantidade	Unidade
Umidade	94	%
Valor energético	16	kcal
Gordura	0,2	g
Carboidratos	2,6	g
Proteínas	2,0	g
Fibra alimentar	2,1	g
Cinzas	1,2	g
Sódio	17,1	mg
Cálcio	97,5	mg
Magnésio	81,6	mg
Manganês	0,7	mg
Fósforo	25,4	mg
Ferro	0,4	mg
Potássio	336	mg
Cobre	0,1	mg
Zinco	0,3	mg
Vitamina A	242	mcg
Tiamina (B1)	0,1	mg
Riboflavina (B2)	0,2	mg
Piridoxina (B6)	0,1	mg
Vitamina C	2,4	mg

NA: Não aplicável

Fonte: TACO (2011).

O espinafre contém uma quantidade significativa de fitoquímicos, que podem ser definidos como compostos bioativos não nutritivos. Os compostos bioativos presentes no espinafre, como os carotenóides (maioritariamente β -caroteno), fenólicos e ainda a vitamina C, trazem muitos benefícios para a saúde humana, como por exemplo, a redução do *stress* oxidativo e a ação protetora contra o cancro gastrointestinal (ROBALO, 2021).

Pieniz et al. (2009) em estudo *in vitro* para avaliação do potencial oxidante de frutas e hortaliças, observaram que o espinafre apresentou maior efeito antioxidante, comparado com a couve, cebola, cenoura, repolho e tomate (BISCARO et al., 2013).

Onoiko & Zolotareva (2024) em seu estudo sobre compostos bioativos e potencial farmacocognóstico, comprovaram a eficácia do espinafre em modelos animais no tratamento de distúrbios metabólicos como obesidade, hiperlipidemia e hiperuricemia, concluindo que o espinafre é uma matéria-prima promissora para obtenção de medicamentos eficazes para o tratamento e prevenção de diversas doenças crônicas e distúrbios metabólicos devido sua ação antioxidante.

O espinafre tem uma durabilidade curta, podendo ser mantido por um período máximo de cinco dias sob refrigeração. Em condição ambiente, pode ser mantido de um dia para outro, desde que seja imerso em água e mantido em local fresco (BIANCO, 2015). Por isso, é interessante a aplicação de um método de conservação, como a secagem por camada de espuma no espinafre, pois além de prolongar sua vida de prateleira, poderá reduzir o desperdício e torná-lo uma nova opção de consumo, para indústria de alimentos, como ingrediente (panificação, gelados, dieta enteral e pronto uso) para novas formulações e para o uso doméstico (culinário) em receitas como vitaminas, sucos, sopas.

3.3 SECAGEM

A secagem é definida como a aplicação do calor sob condições controladas para remover, por evaporação, a maior quantidade de água presente em um alimento. A eliminação da umidade sempre envolve a transferência de massa, que corresponde à água retirada, obtida pela transmissão de calor ao produto (FELLOWS, 2019).

Segundo Bag, Srivastan, Misha (2011), a desidratação ou secagem de alimentos é uma técnica milenar utilizada na conservação de alimentos, pois aumenta a vida de prateleira e também tem o objetivo de desenvolver novos tipos de produtos para o mercado de alimentos.

A secagem é comumente utilizada como forma de preservação, com a finalidade de diminuir a atividade de água para reações de deterioração, aumentar a estabilidade e reduzir o peso e o volume dos alimentos. Além de estender a durabilidade e dispensar o uso da cadeia de frio, nas etapas de transporte e armazenamento, o que favorece a redução dos custos operacionais e de embalagem (SILVA, 2008; MELO, et al., 2013; MARTINS et al., 2020; COSTA, 2022).

A secagem de alimentos de origem vegetal e animal, quanto ao modo de sua realização, se efetua através de dois tipos: secagem natural, também conhecida como solar, ocorre quando o material a ser desidratado é exposto ao sol ou a sombra e a secagem artificial, que é chamada de desidratação, ocorre por meio de calor, umidade relativa e velocidade de ar controlada ou outros meios capazes de retirar a umidade do alimento (EVANGELHISTA, 2005; BEZERRA, 2007).

3.3.1 Secagem em camada de espuma (*foam mat drying*)

O método de secagem conhecido como *foam mat* consiste na transformação de alimentos líquidos ou semilíquidos em uma espuma estável utilizando o processo de batidura e incorporação de ar ou outro gás (COSTA, 2022; MOREIRA et al., 2021), e subsequente desidratação por meios térmicos, até atingir uma baixa atividade de água que impeça o crescimento de microrganismos, reações químicas e/ou enzimáticas (KARIM & CHEEWAI, 1999).

O agente espumante é adicionado quando a matéria prima não contém, em sua composição, proteínas ou saponinas em porcentagem suficiente para produzir espuma estável durante o processo de agitação (SOUZA, 2021). Esse processo pode ser executado em temperaturas relativamente baixas, em torno de 70 °C ou menos, e mantém alta qualidade e boa estabilidade (SILVA et al., 2005).

É uma técnica desenvolvida para promover rápida secagem de alimentos líquidos ou semilíquidos, tais como sucos de frutas, e vem sendo muito utilizada também para alimentos pastosos como purês de frutas e vegetais folhosos: hortelã (LEITE et al., 2023); graviola (OLIVEIRA et al., 2018); couve (SILVA et al., 2023); guajiru (SILVA, 2020); alecrim (SOUZA, 2021); amoreira negra (SILVA, 2021); manjerição (COSTA, 2022). O produto

resultante é poroso e quebradiço, de fácil moagem e transformação em pó com boas propriedades de reidratação (MARQUES, 2009).

As principais vantagens das técnicas de secagem em camada de espuma, quando comparadas com outros métodos de secagem, tais como *spray drying* e secagem em tambor, são temperaturas de secagem mais baixas e tempos de secagem mais curtos. Estas vantagens podem ser atribuídas à maior área de superfície exposta ao ar de secagem, que acelera o processo de remoção de umidade. Além disso, o processo de secagem em camada de espuma é um processo relativamente simples e barato (KARIM & CHEEWAI, 1999; COSTA, 2022).

De modo geral, a capacidade de expansão e a estabilidade da espuma desempenham um papel importante na circulação de água durante a secagem e, por consequência, na qualidade do produto final. A espuma aumenta a eficiência de secagem porque aumenta a área superficial e incrementa a transferência de calor e massa. Além disso, a capilaridade através dos poros da espuma facilita a perda da umidade. Isso faz com que a secagem de uma camada de espuma seja aproximadamente três vezes mais rápida do que a secagem de uma camada similar de líquido (BAG, SRIVASTAV e MISHA, 2011; MARQUES, 2009).

A principal desvantagem dessa técnica em relação a outras técnicas de secagem de líquidos é a necessidade de grande área de superfície de secagem para que consiga atender a elevadas taxas de produção, o que eleva o custo de investimento. Além dessa, outra desvantagem é que os aditivos podem modificar as características de sabor, aroma e cor do alimento (PEREIRA, 2008).

Uma dificuldade que anteriormente foi experimentada com este processo relatada por Karim e Cheewai (1999) é a falta de estabilidade da espuma durante o ciclo de aquecimento. Se a espuma não permanecer estável a destruição celular ocorrerá, causando séria deterioração da operação de secagem (LEITE et al., 2023).

As espumas que não colapsam durante pelo menos 1 hora à temperatura ambiente são consideradas mecanicamente ou termicamente estáveis para o processo inteiro de secagem. As espumas termicamente estáveis retêm a sua estrutura porosa, o que ajuda a melhorar as propriedades de reconstituição do produto secado com espuma. Os produtos espumosos instáveis são difíceis de secar e têm cor, textura, sabor e valor nutritivo pobres (GOUVEIA, 2020).

A adição de agentes espumantes e estabilizadores, como Portogel®, Emustab® e albumina, ajudam a aumentar a estabilidade da espuma durante a secagem. A concentração do

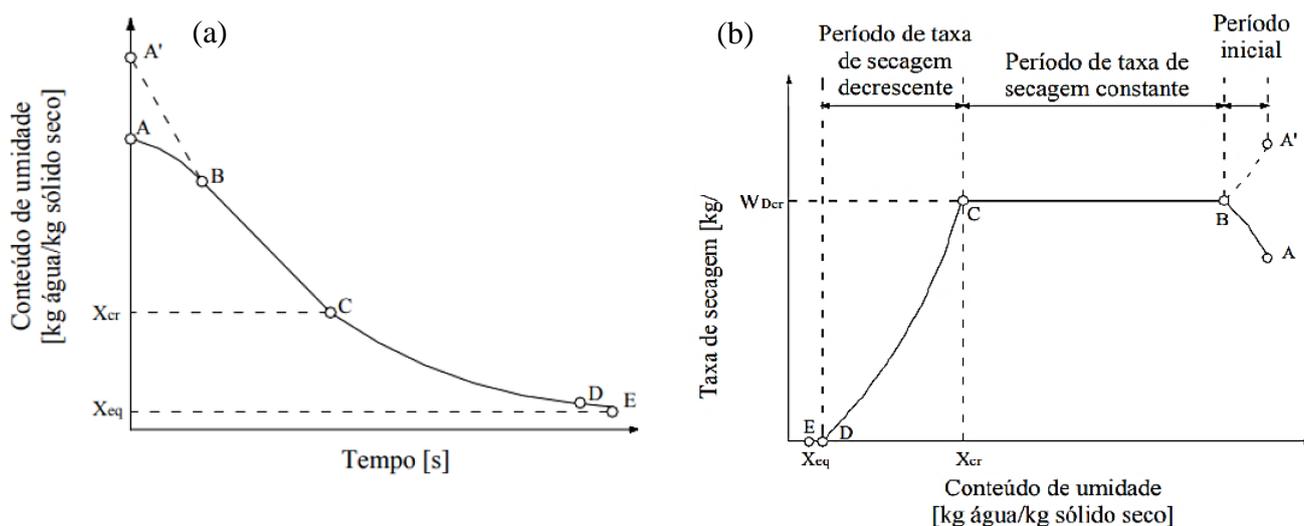
estabilizador de espuma deve ser otimizada porque abaixo da concentração crítica a espuma é instável, enquanto o estabilizador em excesso de dose pode resultar em colapso de espuma (BAG, SRIVASTAV e MISHA, 2011).

3.3.2. Cinética de secagem

As curvas de secagem representam os dados experimentais obtidos, que relacionam a perda de umidade no decorrer do tempo, sob condições constantes de temperatura e umidade do ar de secagem (FELLOWS, 2019; DANTAS, 2010; LEITE et al., 2023). Permite avaliar as variações de massa do produto ao longo do processo, como também ver os períodos de variação de taxa (PAIVA, 2022).

As curvas de secagem podem ser determinadas utilizando dois métodos: monitoramento da perda de umidade do material mediante pesagem direta da amostra ao longo do tempo ou através do monitoramento da umidade do gás (ar) de secagem, na entrada e saída do secador, utilizando-se instrumentos como psicrômetros e higrômetros de infravermelho (FELLOWS, 2019). Na Figura 3.2 estão ilustradas as curvas típica da cinética e taxa de secagem.

Figura 3.2 - Representação da curva típica de: (a) cinética de secagem e (b) taxa de secagem.



Fonte: Adaptado de STRUMILLO & KUDRA (1986).

O trecho AB das curvas ilustradas na Figura 3.2 representa o início da desidratação, quando a superfície do alimento é aquecida até a temperatura da superfície corresponder à temperatura de bulbo úmido do ar (CELESTINO, 2010).

O trecho BC representa o período de taxa constante, pois a velocidade de secagem e a temperatura do bulbo úmido tornam-se constantes, encerra-se quando a umidade crítica é atingida pelo sólido. A partir deste ponto, a temperatura eleva-se e a taxa de secagem reduz rapidamente em função do tempo. O período da taxa decrescente é representado no trecho CD. O alcance da umidade de equilíbrio pode ser percebido quando o alimento se mantém sem alterações de massa, nas mesmas condições de tempo e temperatura (ALVES & NICOLETI, 2016).

A taxa de secagem decresce lentamente até se aproximar de zero no teor de umidade de equilíbrio. A maioria dos danos causados pelo calor no alimento pode acontecer durante o período da taxa decrescente de secagem. É importante controlar a temperatura e o tempo de secagem para evitar a perda de massa devida à queima de matéria seca (FELLOWS, 2019).

O período de taxa decrescente é geralmente a parte mais lenta da operação de secagem. Em alguns alimentos, como frutas e grãos, o teor de umidade inicial está abaixo do teor crítico de umidade e o período de taxa decrescente é a única parte da curva de secagem que é observada (FELLOWS, 2019).

3.3.3 Modelos matemáticos para a secagem

Os modelos matemáticos têm sido empregados para se verificar a validade e concordância dos dados experimentais com os preditos pelos mesmos, ou seja, o quanto os dados experimentais se aproximam ou se distanciam dos preditos. Assim, através dos modelos é possível simular dados cinéticos com o objetivo de avaliar o desempenho da secagem (PAIVA, 2022).

Podem ser teóricos ou semiteóricos. Os modelos teóricos são fundamentados na segunda Lei de Fick, que se baseia na difusão interna como mecanismo que controla a transferência de massa durante o período de taxa de secagem decrescente. Esses modelos levam em conta a resistência interna a transferência de massa. Os modelos semiteóricos baseiam-se na Lei de Newton para o resfriamento, levando em consideração a transferência de massa. Já

os modelos empíricos levam em consideração fatores externos a secagem (REIS, 2019; PAIVA, 2022).

A aplicação dos modelos matemáticos é de suma importância, pois podem descrever o fenômeno e fornecer informações relevantes, reduzindo a quantidade de ensaios em laboratório. Também são utilizados para o desenho de novos sistemas e para o controle e melhoria dos já existentes (FRANCO, 2015; COSTA, 2022).

Os modelos puramente convectivos e os modelos difusivos são os mais utilizados para representar a cinética de secagem. Esses modelos são formulados a partir da análise do comportamento de secagem de uma única partícula, geralmente considera todos os parâmetros de transporte constantes (MAYTA, MASSARANI & PINTO, 1996). No caso, da secagem em camada de espuma, a maioria baseia-se na teoria difusional, da segunda Lei de Fick (FRANCO, 2015). Esse modelo expressa o fluxo de massa por unidade de área e é proporcional ao gradiente de concentração de água e a um coeficiente de difusão de água no sólido (GASPARIN, 2012).

De acordo com Araújo et al. (2017) existem vários modelos empíricos que podem avaliar a cinética de secagem, entre eles se destacam Newton, Page, Page Modificado e Henderson e Pabis. Na Tabela 3.2 estão apresentados alguns modelos matemáticos mais utilizados na literatura para prever o processo de secagem.

Tabela 3.2 - Modelos matemáticos aplicados às curvas de secagem

Nome	Modelo	Equação
Newton	$RU = e^{-kt}$	3.1
Page	$RU = e^{(-kt)^n}$	3.2
Page Modificado*	$RU = ae^{(-kt)^n}$	3.3
Henderson e Pabis	$RU = ae^{-kt}$	3.4
Logarítmico	$RU = ae^{-kt} + c$	3.5
Dois termos	$RU = ae^{-kt} + be^{-nt}$	3.6
Midilli, Kucuk e Yapar	$RU = ae^{-kt^n} + bt$	3.7

t - tempo de secagem (min); k- coeficiente de secagem; a, n e b- parâmetros dos modelos; RU - Razão de Umidade = X/X_0
 *Modificado por MANGUEIRA (2018)

Fonte: Adaptado de ERTEKIN & YALDIZ (2003), FRANCO (2015).

4 METODOLOGIA

A metodologia do desenvolvimento desse trabalho está apresentada em forma de artigos científicos a serem submetidos nos periódicos de impacto na área de Engenharias II:

Artigo 1: CINÉTICA DE SECAGEM DO ESPINAFRE EM CAMADA DE ESPUMA E AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS (A ser submetido. **Revista Holos**. Qualis: A1 em Engenharia II);

Artigo 2: CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DA FOLHA DO ESPINAFRE OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA (A ser submetido. **Revista Observatorio de La Economia Latinoamericana**. Qualis: A4 em Engenharia II);

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões produzidos durante o desenvolvimento desse trabalho estão apresentados em forma de artigos científicos a serem submetidos nos periódicos de impacto na área de Engenharias II e de pedido de patente.

Artigo 1: CINÉTICA DE SECAGEM DO ESPINAFRE EM CAMADA DE ESPUMA E AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS (A ser submetido. **Revista Holos**. Qualis: A1 em Engenharia II);

Artigo 2: CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DA FOLHA DO ESPINAFRE OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA (A ser submetido. **Revista Observatorio de La Economia Latinoamericana**. Qualis: A4 em Engenharia II);

5.1 ARTIGO 1 - CINÉTICA DE SECAGEM DO ESPINAFRE EM CAMADA DE ESPUMA E AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS

KINETICS OF DRYING OF THE FOAM LAYER OF THE SPINACH AND MODELS MATHEMATICALS

RESUMO

O espinafre é uma hortaliça com alto valor nutricional, fonte de fibras, vitaminas e minerais. Contém compostos antioxidantes como vitamina C, compostos fenólicos e carotenoides, o que auxilia na manutenção da saúde e na prevenção de doenças crônicas. A secagem é um método de conservação, cuja finalidade é reduzir o teor de umidade, manter a estabilidade do produto e prolongar sua vida útil. O objetivo desse trabalho foi realizar a secagem em camada de espuma da folha do espinafre. A espuma foi caracterizada quanto a parâmetros físicos (densidade, percentual de expansão, incorporação de ar e estabilidade) e físico-químicos (teor de acidez total titulável, pH e percentual de umidade). A secagem foi realizada de acordo com um planejamento experimental fatorial, no qual as variáveis de entrada foram: concentração de agente espumante (2, 3 e 4 %); tempo de agitação (6, 7 e 8 min) e temperatura (50, 60 e 70 °C) e as variáveis de saída foram: tempo de secagem e teor de umidade (Xbs) do produto. Os dados das cinéticas de secagem foram submetidos ao ajuste matemático utilizando os modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Logarítmico e Midilli. Os resultados obtidos demonstraram que as propriedades físicas da espuma não apresentaram dependência das variáveis de entrada. Na secagem, a temperatura foi a variável com influência estatisticamente significativa no intervalo de confiança 95% no tempo final de secagem. O aumento da temperatura reduziu significativamente o tempo de secagem e o teor de umidade da espuma. O modelo que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais foi o de Page modificado, pois apresentou maior coeficiente de determinação e menor erro padrão de estimativa. Dessa forma, conclui-se que a secagem em camada de espuma da folha do espinafre se mostrou eficiente, sendo possível obter um produto estável e com elevado potencial de aplicação nas indústrias alimentícias e farmacêuticas.

Palavras-chaves: Secagem. Espinafre. Cinética. Modelos matemáticos.

ABSTRACT

Spinach is a vegetable with high nutritional value, a source of fiber, vitamins, and minerals. It contains antioxidant compounds such as vitamin C, phenolic compounds, and carotenoids, which help maintain health and prevent chronic diseases. Drying is a preservation method whose purpose is to reduce moisture content, maintain product stability, and extend its shelf life. The objective of this study was to perform foam layer drying of spinach leaves. The foam was characterized according to physical parameters (density, percentage of expansion, air incorporation, and stability) and physicochemical parameters (total titratable acidity, pH, and moisture percentage). Drying was performed according to a factorial experimental design, in which the input variables were: foaming agent concentration (2, 3 and 4%); agitation time (6, 7 and 8 min), and temperature (50, 60 and 70 °C), and the output variables were: drying time and moisture content (Xbs) of the product. The drying kinetics data were subjected to mathematical adjustment using the Newton, Page, modified Page, Henderson and Pabis, Logarithmic and Midilli models. The results obtained demonstrated that the physical properties of the foam did not show dependence on the input variables. During drying, temperature was the variable with statistically significant influence on the 95% confidence interval in the final drying time. Increasing the temperature significantly reduced the drying time and the moisture content of the foam. The model that presented the best fit to the experimental data was the modified Page model, as it presented the highest coefficient of determination and a lower standard error of estimate. Thus, it is concluded that the foam layer drying of spinach leaves proved to be efficient, making it possible to obtain a stable product and with high potential for application in the food and pharmaceutical industries.

Keywords: Drying. Spinach. Kinetics. Mathematical models.

1. INTRODUÇÃO

A perda pós-colheita de hortaliças é elevada e potencializada com manipulação e conservação inadequadas. De acordo com os dados da Associação Brasileira de Supermercados (ABRAS), as hortaliças folhosas ocupam o 4º lugar de alimentos mais desperdiçados, pelos supermercados, em termos de volume (BRASIL, 2022). Por isso, para reduzir esse prejuízo e manter os atributos mais próximos possíveis ao alimento *in natura* são utilizadas técnicas de conservação. Estas, em folhosas, tendem a assegurar a qualidade do produto final e gerar menor descarte (BARBOSA, FINGER e CASALI, 2015), podendo ser aplicadas em diversos alimentos (ROCHA *et al.*, 2008; SANTOS FILHO *et al.*, 2018).

O espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L.) é uma hortaliça folhosa fonte de minerais, vitaminas, fibras e compostos bioativos, que pode servir como um complemento valioso a uma dieta equilibrada para manter à saúde, prevenir e tratar diversas doenças crônicas e distúrbios metabólicos (ONOIKO e ZOLOTAREVA, 2024).

O estudo realizado por Cherobin *et al.* (2023) comprovou a eficiência do extrato de espinafre comparado ao sal de cura comercial como conservante em linguça frescal armazenada por 35 dias sob refrigeração e concluíram que o extrato de espinafre pode ser uma alternativa promissora para indústria de carnes possibilitando o desenvolvimento de produto mais saudável.

Amaro (2009), no estudo da caracterização da eficiência anti-radicalar e do teor de fenólicos em espinafre concluiu que a elevada atividade anti-radicalar apresentada pelo espinafre, torna-o um alimento com potencial benefício à saúde, ajudando a reduzir o risco de desenvolvimento de patologias degenerativas associadas ao estresse oxidativo excessivo.

O espinafre é bastante perecível e tem durabilidade muito curta após a colheita, devido ao alto teor de umidade tornando-o susceptível às reações bioquímicas de deterioração, responsáveis

pela perda de qualidade dessa hortaliça. Por isso, se faz necessário a utilização de um método de conservação, como a secagem, que reduz o teor de água, prolonga a vida útil, além de favorecer o transporte e o armazenamento, reduz o custo operacional dispensando o uso da cadeia de refrigeração (BALDI *et al.*, 2021; RESENDE *et al.*, 2010).

Dentre as formas de secagem, destaca-se a secagem em camada de espuma, que consiste em transformar alimentos líquidos ou semilíquidos em espuma estável por meio da adição de agentes emulsificantes ou estabilizantes, podendo ser aplicada em diversos tipos de alimentos (MOREIRA *et al.*, 2021).

É um método relativamente simples e pode ser realizado a um custo menor do que a secagem por *spray drying* e liofilização, e em temperaturas mais baixas, o que ajuda preservar os nutrientes nos vegetais (MEI LING e SULAIMAN, 2018). Outra vantagem é promover 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 processo, resultando na redução da atividade de água, aumento da vida útil, além disso, o produto resultante pode ser potencializado economicamente e facilmente reconstituídos (MOHAMED *et al.*, 2022).

Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo realizar a secagem em camada de espuma da folha do espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L.) bem como avaliar a modelagem e cinética de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

2. METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados nos Laboratórios de Termodinâmica, Operações Unitárias e Bioengenharia pertencentes ao Departamento de Engenharia Química no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus João Pessoa – PB, Brasil. A pesquisa científica realizada

foi de caráter quantitativo, conforme descrito por Pereira *et al.* (2018) caracteriza-se por gerar conjuntos ou massas de dados que podem ser analisados por meio de técnicas matemáticas.

2.1 Matéria-prima

O espinafre foi obtido fresco no comércio local da cidade de João Pessoa - PB. As amostras foram avaliadas visualmente, sendo utilizadas as folhas verdes, descartando os talos, as folhas amareladas e com danos mecânicos ou causados por pragas. Posteriormente foram lavadas em água corrente e imersas em solução de hipoclorito de sódio (100 mg L^{-1}) por 10 minutos, seguido de enxágue com água corrente para eliminar o cloro residual, sendo o excesso de umidade retirado com papel toalha. Esse procedimento foi realizado de acordo com Resolução RDC nº 218/2005 da ANVISA (BRASIL, 2005a), que regulamenta procedimentos higiênico-sanitários para manipulação de alimentos e bebidas preparados com vegetais.

2.2 Seleção do emulsificante e das condições operacionais para formação de uma espuma estável

Os testes preliminares foram realizados com o objetivo de determinar o emulsificante, a sua mínima concentração e o tempo de agitação, para formar uma espuma estável. Para isso, os emulsificantes selecionados foram Emustab® e Portogel®. O critério de seleção do emulsificante foi realizado comparando os resultados obtidos quanto a espumabilidade e estabilidade da espuma com base na metodologia de Costa (2022). A definição da concentração do emulsificante e o tempo de agitação foi realizada por meio de ensaios experimentais utilizando diferentes concentrações do emulsificante (2 a 6%) e tempos de agitação (6 a 10 min) e também com base em estudos da secagem em camada de espuma da folha da couve (SILVA *et al.*, 2023), da hortelã da folha miúda (LEITE *et*

al., 2023) e do manjericão (COSTA, 2022). Já as condições para temperatura de secagem foram baseadas nos estudos da secagem em camada fina de folhas de espinafre em secador convectivo (DOYMAZ, 2009), Secagem folhas de espinafre por convecção (Azevedo, 2012) e no estudo da Cinética de secagem do espinafre (*Tetragonia tetragonoides*) realizado por Lemos *et al.* (2016).

2.3 Obtenção do derivado vegetal

O derivado vegetal formado por folhas de espinafre com água destilada foi preparado utilizando a proporção de 1:2 (m/v): 50g das folhas de espinafre para 100 mL de água destilada. Essa mistura foi triturada em um liquidificador industrial da marca Metvisa 2 L, com velocidade constante de 1800 rpm por 1 min e potência máxima 1000 W, até a obtenção de uma mistura homogênea. As mesmas condições foram aplicadas para a realização de todos os experimentos.

2.4 Produção da espuma

Como o espinafre não possui propriedade espumante foi necessário adicionar o Portogel® ao derivado vegetal para promover a formação de uma espuma estável.

A espuma foi produzida por agitação mecânica em batedeira doméstica (modelo Planetária Deluxe da marca Arno) em velocidade máxima e potência de 600 W, de acordo com as condições operacionais definidas para formar a espuma.

2.5 Planejamento experimental

A técnica de planejamento experimental fatorial completo foi utilizada para avaliar a eficiência do processo de secagem em camada de espuma do espinafre, com isso verificar os efeitos significativos das variáveis de entrada (concentração do emulsificante, tempo de agitação e temperatura de secagem) sobre as variáveis respostas (tempo de secagem e teor de umidade). Os valores não codificados foram definidos a partir de testes preliminares e estão apresentados na Tabela 1.

O planejamento experimental fatorial completo utilizado neste estudo foi do tipo 2^3 com três repetições no ponto central, resultando em uma matriz com 11 experimentos e está apresentado na Tabela 2. Para garantir a aleatoriedade do planejamento, a ordem de realização dos experimentos foi definida por sorteio.

Tabela 1 - Valores codificados e reais das variáveis independentes

Variáveis independentes	Níveis		
	-1	0	+1
C (%)	2 (-1)	3 (0)	4 (+1)
t _{ag} (min)	6 (-1)	7 (0)	8 (+1)
T (°C)	50 (-1)	60 (0)	70 (+1)

C: concentração do emulsificante; tag: tempo de agitação; T: temperatura de secagem

Fonte: Elaboração própria

Tabela 2 - Matriz do planejamento experimental

Experimento	Variáveis independentes		
	C (%)	t _{ag} (min)	T (°C)
01	2 (-1)	6 (-1)	50 (-1)
02	4 (+1)	6 (-1)	50 (-1)
03	2 (-1)	8 (+1)	50 (-1)
04	4 (+1)	8 (+1)	50 (-1)

Continua

Tabela 2 – Matriz do planejamento experimental

			Conclusão
05	2 (-1)	6 (-1)	70 (+1)
06	4 (+1)	6 (-1)	70 (+1)
07	2 (-1)	8 (+1)	70 (+1)
08	4 (+1)	8 (+1)	70 (+1)
09	3 (0)	7 (0)	60 (0)
10	3 (0)	7 (0)	60 (0)
11	3 (0)	7 (0)	60 (0)

C: concentração do emulsificante; tag: tempo de agitação; T: temperatura de secagem

Fonte: Elaboração própria

2.6 Análise das propriedades físicas da espuma

A espuma foi caracterizada em triplicata quanto aos seguintes parâmetros: densidade, percentual de expansão, incorporação de ar, umidade, pH, acidez e estabilidade.

2.6.1 Densidade

Segundo o método de Brooker *et al.* (1992) 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 de acordo com a Equação 1.

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

Em que,

ρ - densidade da espuma ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); m: massa da espuma (g);

v - volume ocupado pela espuma (cm^3).

2.6.2 Percentual de expansão

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 definido na Equação 2 e metodologia descrita por Feitosa *et al.* (2017).

$$\%expans\tilde{a}o = \left(\frac{\left(\frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_{dv}} \right)}{\frac{1}{\rho_{dv}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que,

$\%expans\tilde{a}o$ - percentual de expansão da espuma (%);

ρ_e - densidade da espuma (g.cm^{-3});

ρ_{dv} - densidade do derivado vegetal (g.cm^{-3}).

2.6.3 Incorporação de ar (*over run*)

Para determinação da capacidade de incorporação de ar foi avaliado um volume conhecido do derivado vegetal antes da agitação, e o volume de espuma formado após a agitação conforme metodologia de Moreira *et al.* (2021).

Foi medido em um béquer de 1000 mL, 100 mL do derivado vegetal e em seguida colocado sob a agitação, segundo o planejamento experimental fatorial determinado. A espuma formada, foi transferida para o béquer e anotado o volume obtido após a agitação. Para o cálculo do *Over Run* utilizou-se a Equação 4.3:

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

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).

2.6.4 Umidade

A análise do teor de umidade foi realizada pelo método gravimétrico, por meio da secagem direta em estufa de esterilização a 105 °C por 24 h (IAL, 2008). O teor de umidade em base seca foi calculado pela Equação 4.

$$U_{bs} = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \quad (4)$$

Em que:

U_{bs} - teor de umidade em base seca (adimensional);

m_i - massa inicial do material (g); m_f - massa final do material (g).

2.6.5 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH foi realizado por meio do método potenciométrico, utilizando o pHmetro Testo 206 previamente calibrado com soluções tampão (pH 4,0 e pH 7,0).

2.6.6 Acidez total titulável (ATT)

A ATT foi determinada por meio do método titulométrico com solução padronizada de NaOH 0,1M e indicador fenoftaleína 1% cujos resultados expressos em g de ácido cítrico por 100 g

da amostra (IAL, 2008). O cálculo da acidez foi realizado utilizando a Equação 5 e o resultado foi expresso em g de ácido cítrico.

$$ATT = \frac{V*f*M*PM}{10*P*n} \quad (5)$$

Em que:

ATT - acidez total titulável (%); f: fator da solução de NaOH 0,1 M;

V - volume da solução de hidróxido de sódio gasto na titulação (mL);

P - massa da amostra (g); M: molaridade da solução de hidróxido de sódio;

PM - peso molecular do ácido cítrico; n: número de hidrogênio ionizáveis.

2.6.7 Estabilidade

A estabilidade da espuma foi determinada de acordo com a técnica descrita por Karim e Cheewai (1999) em que o volume drenado de 20 g da espuma depositada em um funil com filtro de nylon sobre uma proveta graduada, colocadas em estufa com circulação de ar sob as mesmas condições de secagem definidas no planejamento experimental, foi medido a cada 10 min, durante o período de 90 min. A estabilidade é inversamente proporcional ao volume de líquido drenado, ou seja, quanto maior o volume drenado menor será a estabilidade da espuma. O procedimento foi realizado em triplicata para cada experimento.

2.7 Secagem em camada de espuma

As espumas foram dispostas em bandejas de inox, dimensões 37 x 22 cm, com espessura fixa de 5 mm e colocadas em uma estufa com circulação e renovação de ar marca Lucadema, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. A redução do teor de água foi determinada por pesagens da amostra em balança semi-analítica, até peso constante. 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.

De acordo com a Equação 6, determinou-se a razão do teor de água do espinafre em pó 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 *software* Origin versão 6.0.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (6)$$

Em que,

RU - razão de teor de água (adimensional);

U - teor de água da amostra em um determinado tempo de secagem (bs);

U_i - teor de água inicial da amostra (bs); U_e - teor de água de equilíbrio da amostra (bs).

2.8 Modelos matemáticos

Muitos 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 semi-empíricas 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 do espinafre (Tabela 3).

Tabela 3 - Modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem
Continua

Nome	Modelo	Equação
Newton	$RU = e^{-kt}$	7
Page	$RU = e^{(-kt)^n}$	8
Page Modificado*	$RU = ae^{(-kt)^n}$	9

Tabela 3 - Modelos matemáticos utilizados para prever o processo de secagem
Conclusão

		Conclusão
Henderson e Pabis	$RU = ae^{-kt}$	10
Logarítmico	$RU = ae^{-kt} + c$	11
Dois termos	$RU = ae^{-kt} + be^{-nt}$	12
Midilli, Kucuk e Yapar	$RU = ae^{-kt^n} + bt$	13

Em que: RU: razão do teor de água do produto (adimensional); t: tempo de secagem (h); k: coeficientes de secagem; a, n: constantes dos modelos matemáticos.

*(Mangueira *et al.*, 2020)

Fonte: Elaboração própria

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.

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

Em que,

W - taxa de secagem (g/cm².min); m_{ss} - massa de sólidos secos da amostra (g);

A - área de secagem (cm²); U_{bs}- umidade em base seca; t - tempo (min).

Para avaliar o ajuste matemático das curvas de cinética de secagem, os modelos foram selecionados considerando a magnitude do coeficiente de determinação (R²) e erro padrão da estimativa (SQ), os quais foram calculados utilizando as equações 15 e 16 respectivamente.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (RU_{pred,i} - RU_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (RU_{exp,i} - RU_{pred,i})^2} \right) \quad (15)$$

$$SQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RU_{exp,i} - RU_{pred,i})^2}{n}} \quad (16)$$

Em que,

RU_{pred,i} - razão do teor de água predito pelo modelo; RU_{exp,i}- razão do teor de água experimental;

n: número de observações experimentais;

2.9 Análise estatística

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.

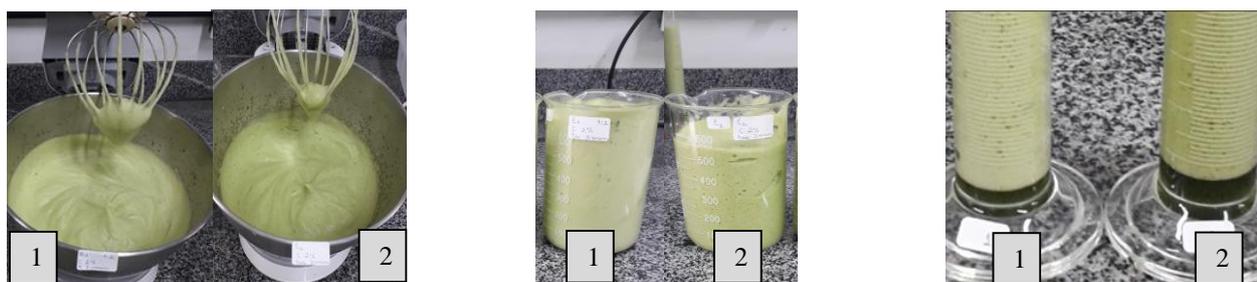
O programa computacional Statistica® versão 7.0 foi utilizado para ajuste dos modelos matemáticos por meio da análise de regressão não linear pelo método de estimativa Gauss-Newton e também para verificar os efeitos principais e suas interações das variáveis independentes sobre variáveis respostas e para análise de variância (ANOVA), possibilitando a otimização do processo de secagem em estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Testes preliminares

Os resultados dos testes para seleção do emulsificante (Portogel® ou Emustab®) para a formação da espuma estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Características da espuma para cada emulsificante 1 - Portogel® e 2 – Emustab®.



Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 1, percebeu-se que a espuma formada pelo Portogel® (1) apresentou maior aeração do que a formada com o Emustab® (2), bem como despreendeu menor volume de líquido, demonstrando maior estabilidade. Portanto, o emulsificante mais eficiente para produção da espuma da folha de espinafre foi o Portogel® pois formou uma espuma mais estável usando menor concentração para as mesmas condições utilizando Emustab®. As condições definidas foram: concentração do emulsificante 2, 3 e 4%, tempo de agitação 6, 7 e 8 min e temperatura 50, 60 e 70 °C.

4.2 Caracterização da espuma

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados médios e o desvio padrão das propriedades físicas da espuma.

As análises das características da espuma, exceto da estabilidade, não dependem das temperaturas de secagem utilizadas, por isso foram analisadas apenas os 5 experimentos, utilizando as diferentes condições de concentração do emulsificante e tempo de agitação e o ponto central.

Tabela 4 - Características físicas da espuma do espinafre

Condições do Experimento	Densidade g.cm ⁻³	pH	Acidez (g de ác.citrico / 100 g)	Expansão (%)	Incorporação de ar (%)	Umidade (%)
1 (C 2%; t _{ag} 6 min)	0,089 ^{ab} ± 0,005	6,033 ^c ± 0,009	0,139 ^a ± 0,002	1073,231 ^b ± 33,049	696,296 ^c ± 13,095	97,2325 ^a ± 0,038
2 (C 2%; t _{ag} 8 min)	0,090 ^a ± 0,04	6,090 ^b ± 0,008	0,138 ^a ± 0,006	1011,723 ^b ± 46,129	751,852 ^b ± 13,095	97,341 ^a ± 0,018
3 (C 3%; t _{ag} 7 min)	0,076 ^c ± 0,001	6,027 ^c ± 0,009	0,119 ^b ± 0,003	1217,151 ^a ± 8,278	779,630 ^b ± 13,095	97,121 ^b ± 0,016
4 (C 4%; t _{ag} 6 min)	0,078 ^{bc} ± 0,001	6,523 ^a ± 0,012	0,1142 ^b ± 0,003	1177,094 ^a ± 27,741	779,630 ^b ± 13,889	96,863 ^c ± 0,073
5 (C 4%; t _{ag} 8 min)	0,075 ^c ± 0,000	6,037 ^c ± 0,009	0,136 ^a ± 0,0000	1222,097 ^a ± 21,405	830,556 ^a ± 13,095	96,988 ^{bc} ± 0,104

Letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey (p < 0,05). C: concentração do espumante; t_{ag}: tempo de agitação.

Fonte: Elaboração própria

Para análises estatísticas das propriedades da espuma, exceto a estabilidade, foram consideradas apenas as variáveis independentes: concentração do emulsificante e tempo de agitação conforme planejamento experimental, já que a temperatura não exerce influência sobre as suas características físicas, uma vez que são avaliadas antes do processo de secagem.

Foi observado na Tabela 4, que a maior densidade foi apresentada pelo experimento de menor concentração de emulsificante e menor tempo de agitação (0,090) e a menor pelo experimento com concentração de 4% e tempo de agitação de 8 min (0,075), demonstrando correlação de proporcionalidade entre concentração e a densidade. Esse comportamento corrobora com o princípio de que quanto maior o volume ocupado por determinada massa maior será sua densidade. Azizpour *et al.* (2013) reportam que essa redução do valor da densidade indica maior introdução de ar na espuma durante a agitação, e conseqüentemente maior volume. Ainda segundo o mesmo autor, menores valores de densidade são desejáveis, pois podem facilitar e acelerar a difusão da água pela espuma resultando em menor tempo de secagem. Oliveira *et al.* (2020), ao estudar a folha da graviroleira encontrou o mesmo comportamento para densidade da espuma assim como Silva *et al.* (2023) ao estudar a folha da couve.

Para expansão, constatou-se que a espuma com menor densidade atingiu a maior expansão (1222,097%), resultado decorrente da maior incorporação e retenção de ar. Por outro lado, o agente espumante com menor concentração (2%) promoveu sua redução. Foi verificado que o aumento simultâneo da concentração e tag promoveu uma maior expansão.

Leite *et al.* (2023) avaliaram a densidade de espumas no trabalho com a hortelã-da-folha-miúda (*Mentha crispa*) e observaram maiores valores de expansão volumétrica para menores valores de densidade, resultado análogo ao atual estudo, o que corrobora com Susanti *et al.* (2021) que relatam que o percentual da expansão indica a capacidade do agente emulsificante em criar as bolhas sem ruptura.

Segundo Dantas (2010), a expansão da espuma acima de 100% é o ideal para o processo de secagem, conforme com os resultados encontrados neste estudo.

O maior valor médio obtido para incorporação de ar foi de 830,556%, verificado nas condições máximas do planejamento experimental e o menor valor (696,296%) nas condições mínimas. Mesmo com tempo de agitação variando entre o mínimo e o máximo, ocorreu uma diferença pouco expressiva entre os resultados. Em geral, a incorporação de ar foi menor quando se utilizou menores concentrações de emulsificante, mesmo comportamento encontrado por Leite *et al.* (2023).

As espumas demonstraram baixa acidez, com pH variando entre 6,027 a 6,523, sendo o maior valor médio encontrado na condição 4 (C 4%, t_{ag} 6 min). Valores próximos foram encontrados por Zanatta, Schlablitz e Ethur. (2010) e Paula *et al.* (2009), 6,03 e 6,4 respectivamente, para folha do espinafre *in natura*.

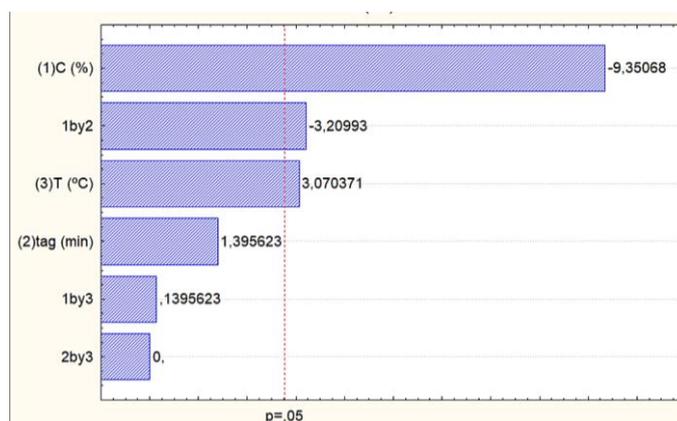
Quanto à umidade verifica-se variações irrelevantes nas diferentes condições estudadas, mesmo comportamento apresentado no estudo de Moraes (2021), referente a secagem em camada de espuma da folha do mastruz que encontrou valores de umidade entre 94,75 e 96,38%.

A acidez em todas as condições estudadas também apresentou valores na mesma ordem de grandeza, com pequena variação, resultado similar encontrado por Moraes (2021).

A estabilidade é um parâmetro fundamental a ser analisado pois está diretamente relacionado à eficiência do processo de secagem em camada de espuma. A estrutura da espuma deve se manter mecânica e termodinamicamente estável, pois o seu colapso acarreta a desestruturação celular tornando ineficiente a remoção da água da superfície e reduzindo a qualidade do produto final obtido (FRANCO, 2015). Bag *et al.* (2011), acrescenta ainda, que o colapso das espumas também pode ocorrer devido a força da gravidade atuando sobre a espuma pelo aumento do volume, que resulta em fusão de pequenas bolhas de ar.

O diagrama de Pareto (Figura 2), demonstra que as variáveis concentração do emulsificante e temperatura bem como a interação entre as ambas (%C x T) apresentaram influência estatisticamente significativa ($p < 0,05$) sobre a estabilidade da espuma formada, sendo a concentração a variável que tem maior influência no resultado. O efeito negativo indica que quanto maior a concentração do emulsificante, menor o volume drenado e consequentemente maior a estabilidade da espuma, visto que são parâmetros inversamente proporcionais e dependentes.

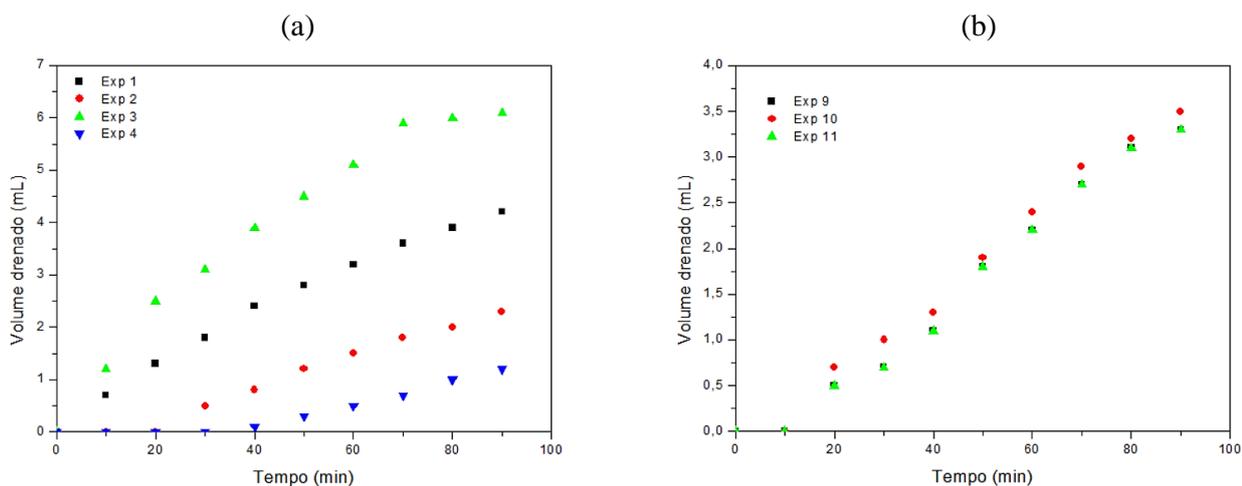
Figura 2 - Diagrama de Pareto: Efeito das variáveis de entrada e suas interações sobre a estabilidade da espuma do espinafre.

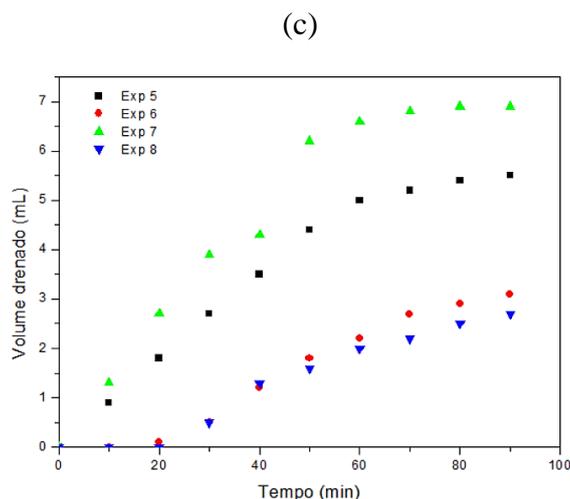


Fonte: Elaboração própria

A estabilidade da espuma foi avaliada para todas as condições do planejamento experimental fatorial completo por meio do volume drenado desprendido. Na Figura 3, são mostrados os volumes drenados nas temperaturas de 50 °C (a), 60 °C (b) e 70 °C (c), respectivamente.

Figura 3 - Testes de estabilidade da espuma do espinafre a (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C.





Fonte: Elaboração própria

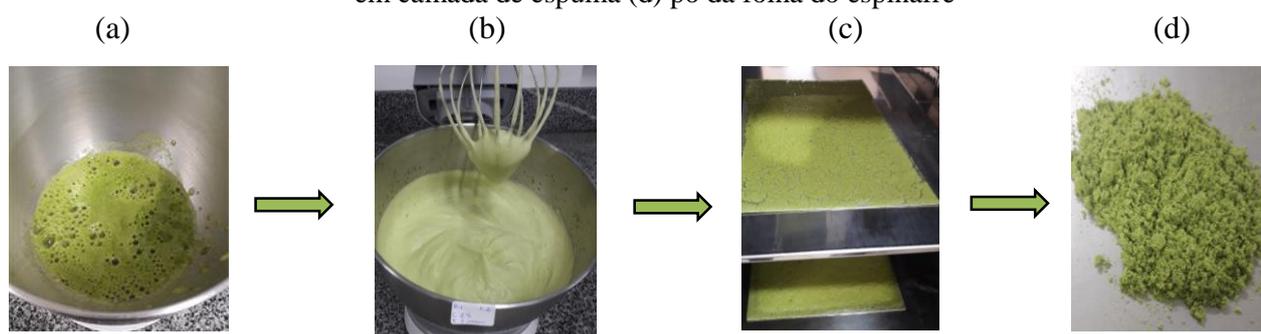
De acordo com a Figura 3, pode-se observar também que o comportamento das curvas de estabilidade é semelhante, nas diferentes temperaturas. Na temperatura de 50 °C, o maior volume drenado foi de 6,1 mL, enquanto para de 70 °C o volume máximo desprendido foi de 6,9 mL. Já na temperatura de 60 °C o volume médio desprendido foi de 3,3 mL. Percebe-se que os maiores volumes drenados ocorreram nos experimentos que apresentam a menor concentração de emulsificante 2% e maior tempo de agitação 8 min (experimentos 3 e 7), demonstrando uma relação de dependência entre a temperatura e o volume desprendido, isto é, sob as mesmas condições quanto maior a temperatura maior o volume desprendido. Com base nos resultados obtidos, constatou-se que as espumas mais estáveis foram as dos experimentos 4 e 8, onde foram utilizados a maior concentração e o maior tempo de agitação, resultado semelhante encontrado por Costa (2022), no estudo da secagem da folha do manjericão.

Após análise estatística foi verificado que as variáveis independentes (concentração de emulsificante e tempo de agitação) e suas interações não apresentaram influência estatisticamente significativa, ao nível de significância de 5%, sobre as características físicas da espuma (densidade, pH, acidez, expansão, incorporação de ar e umidade), com exceção da estabilidade.

4.3 Secagem em camada de espuma do espinafre

O processo de obtenção do pó da folha de espinafre por camada de espuma está ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Processo de obtenção do pó da folha do espinafre: (a) derivado vegetal (b) espuma (c) secagem em camada de espuma (d) pó da folha do espinafre



Fonte: Elaboração própria

4.3.1 Análise estatística das variáveis independentes

Os resultados do tempo final de secagem e do teor de umidade são mostrados na Tabela 5.

De acordo com os resultados da Tabela 5, o menor tempo de secagem foi apresentado pelo experimento 8 (concentração de 4%, tempo de agitação de 8 minutos e temperatura de 70 °C), 80 minutos, enquanto o maior foi apresentado pelo experimento 1 (concentração de 2%, tempo de agitação de 6 minutos e temperatura de 50 °C) de 240 minutos. Já os experimentos centrais tiveram valores próximos, o que demonstra uma boa reprodutibilidade dos mesmos.

Tabela 5 - Resultado do tempo final de secagem e do teor de umidade da espuma do espinafre.

Experimento	Variáveis independentes			Variáveis dependentes	
	C (%)	t _{ag} (min)	T (°C)	t _{f sec}	U _{bs} (%)
01	2 (-1)	6 (-1)	50 (-1)	240	15
02	4 (+1)	6 (-1)	50 (-1)	150	7,4

Continua

Tabela 5 - Resultado do tempo final de secagem e do teor de umidade da espuma do espinafre.
Conclusão

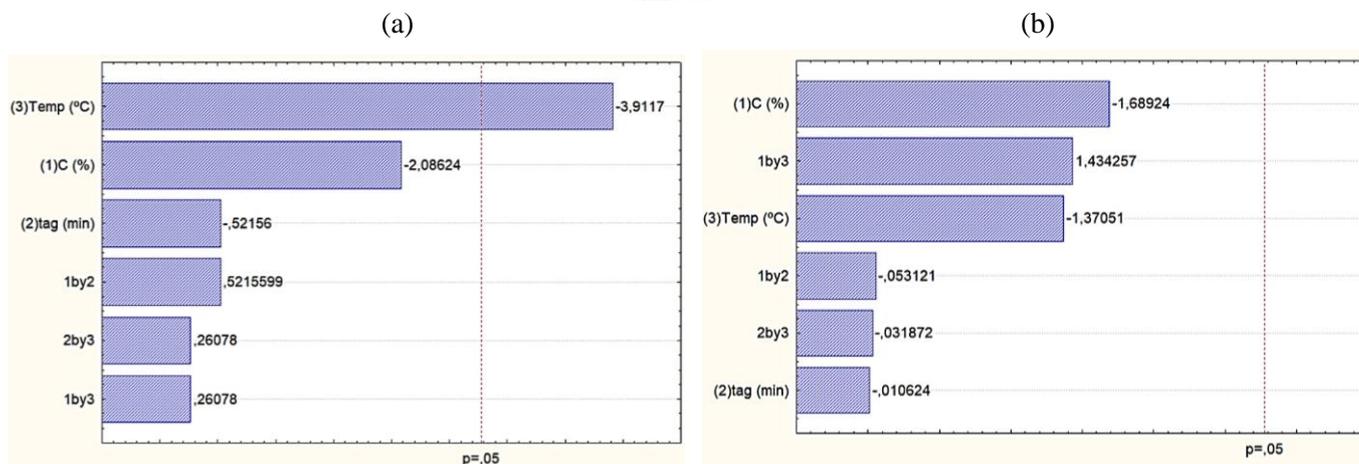
03	2 (-1)	8 (+1)	50 (-1)	180	14,8
04	4 (+1)	8 (+1)	50 (-1)	180	7,7
05	2 (-1)	6 (-1)	70 (+1)	120	8,1
06	4 (+1)	6 (-1)	70 (+1)	110	8,1
07	2 (-1)	8 (+1)	70 (+1)	140	8,5
08	4 (+1)	8 (+1)	70 (+1)	80	7,4
09	3 (0)	7 (0)	60 (0)	140	14,1
10	3 (0)	7 (0)	60 (0)	170	13,9
11	3 (0)	7 (0)	60 (0)	150	14,3

C: concentração do emulsificante; tag: tempo de agitação; T: temperatura de secagem; $t_{f,sec}$: tempo final de secagem; U_{bc} : umidade

Fonte: Elaboração própria

Os resultados para a análise da influência das variáveis independentes no tempo final de secagem da espuma da folha do espinafre e no teor de umidade são mostrados na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama de Pareto para: (a) tempo final de secagem da espuma do espinafre e (b) teor de umidade.



Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 5(a) foi observado que a temperatura foi a variável que influenciou o tempo final de secagem em um intervalo de confiança de 95%. O efeito negativo (-3,9117) revela que quanto maior for a temperatura, menor será o tempo final de secagem. Esse comportamento também foi

observado por Leite *et al.* (2020) e por Silva *et al.* (2023) ao estudar a secagem em camada de espuma da hortelã-da-folha-miúda e couve respectivamente.

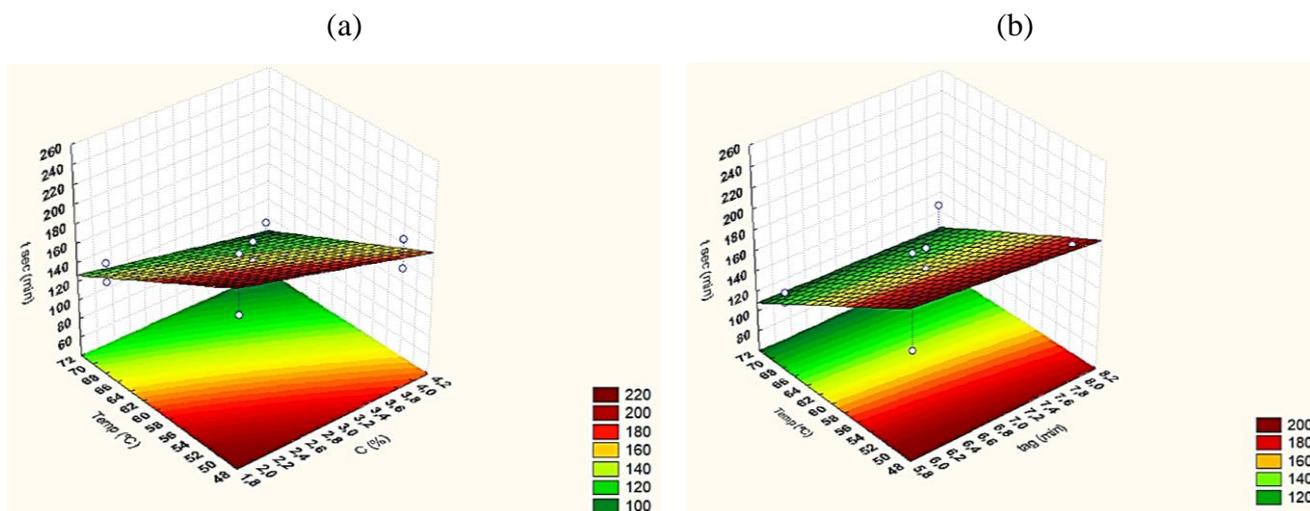
O modelo estatístico para a tempo de secagem em camada de espuma do espinafre foi obtido por regressão linear múltipla dos dados experimentais do processo de secagem e pode ser representado pela Equação (17). Este modelo possui coeficiente de determinação (R^2) de 83,56% e um erro padrão de 2940,91.

$$t_{\text{sec}} = 150,9091 - 75T \quad (17)$$

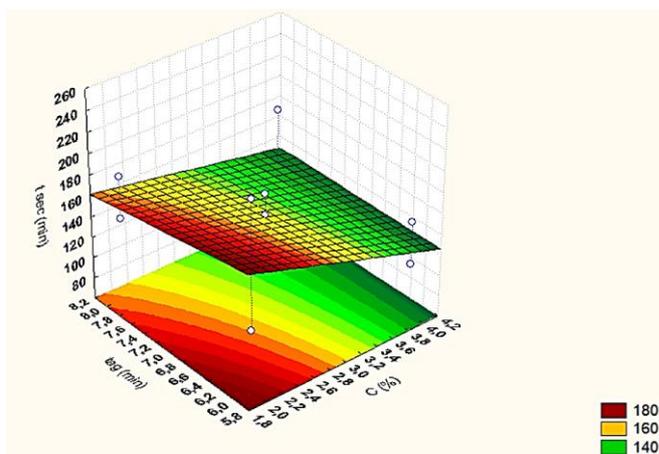
Ao realizar a análise de variância (ANOVA) dos dados para a variável tempo de secagem, verifica-se que a 95% de confiança, o modelo representado pela equação (17) não é estatisticamente significativo, conforme Teste F, pois o valor $F_{\text{calculado}}$ é menor que o F_{tabelado} ($3,3890 < 6,1630$) levando-se em conta o nível de confiança estabelecido e os graus de liberdade da regressão e do resíduo. Por meio do “valor-p” observa-se que as variáveis concentração do emulsificante e tempo de agitação não são significativamente relacionadas com a variável dependente, levando em conta que ambas, individualmente, apresentaram valor-p $> 0,05$, em um intervalo de 95% de confiança (0,065801 e 0,452277, respectivamente).

As superfícies de respostas para o tempo final de secagem associado às demais variáveis concentração do emulsificante, tempo de agitação e temperatura estão ilustradas na Figura 6.

Figura 6. Superfícies de respostas obtidas para o tempo final de secagem, mantendo constante em níveis médios: (a) concentração do emulsificante; (b) tempo de agitação; (c) temperatura de secagem.



(c)



Fonte: Elaboração própria

A partir da análise da Figura 6(a) foi observado que quanto menor a temperatura maior será o tempo final de secagem e que o tempo de agitação não apresentou nenhuma influência sobre a variável de resposta, para uma concentração do emulsificante constante.

Na Figura 6(b) é possível analisar que para um tempo de agitação constante, a concentração do emulsificante não tem influência na variável de resposta, e para a variável temperatura, à medida que a mesma se eleva observa-se uma redução no tempo final de secagem.

Na Figura 6(c), verifica-se que mantendo a temperatura constante, as variáveis: concentração do emulsificante e tempo de agitação não exercem influência sobre variável de resposta tempo de secagem (t_{sec}).

Já a análise estatística do teor de umidade (U_{bs}) revela que nenhuma variável de entrada, nem suas interações foram estatisticamente significativas a nível de 95% de confiança, portanto a variação desse fator não afetou de forma considerável as curvas de secagem, nas condições estudadas, fato que possibilita escolher as condições mínimas dessas variáveis e assim obter redução dos gastos energéticos, podendo ser melhor visualizado por meio do gráfico de Pareto ilustrado pela Figura 5 (b).

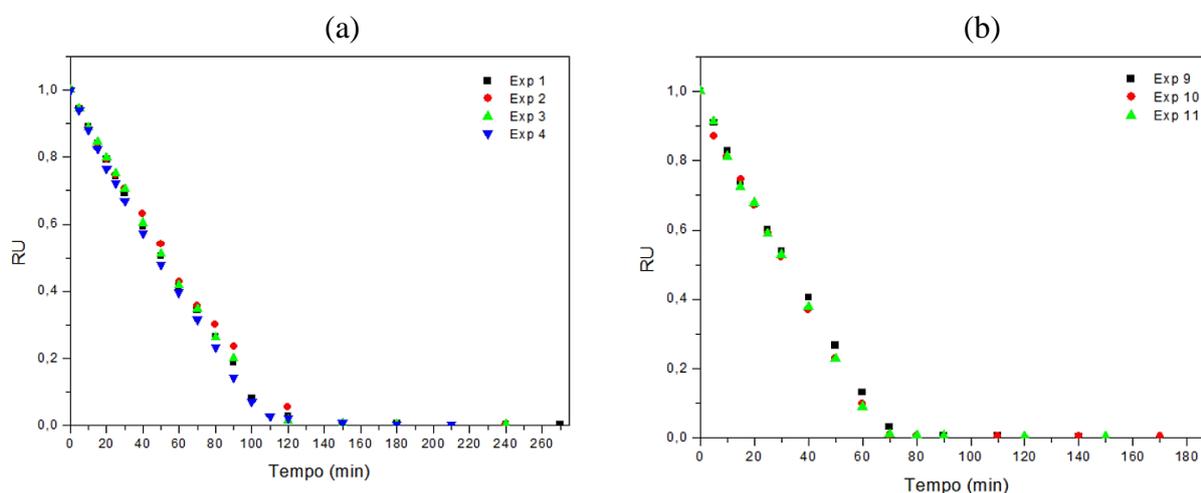
Moraes *et al.* (2021), no estudo da obtenção do pó da folha do mastruz (*Chenopodium ambrosioides* L.) e ambos utilizando a secagem por camada de espuma também verificaram que a temperatura de secagem foi a variável que influenciou o tempo de secagem e que não houve influencia significativa das variáveis independentes sobre o teor de umidade, corroborando com o resultado obtido neste estudo.

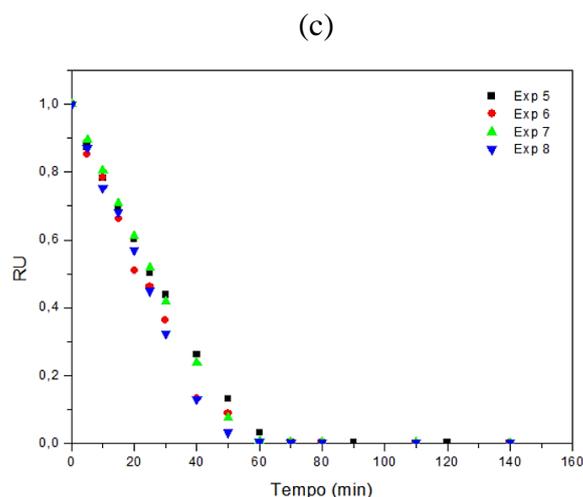
De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, observa-se que o teor de umidade obtido, em todas as temperaturas combinadas com tempos suficientes para que ocorra equilíbrio (secagem até massa constante), encontra-se dentro do limite de estabelecido pela legislação brasileira, que preconiza que produtos como farinha ou farelo, apresentem limite máximo de 15% (ANVISA, 2005).

4.4 Cinética de secagem

As curvas da cinética de secagem da espuma do espinafre estão representadas na Figura 7, cujos dados são apresentados na forma de razão de umidade RU (adimensional) em função do tempo de secagem (min) para as temperaturas definidas pelo planejamento experimental, de 50, 60 e 70 °C respectivamente.

Figura 7 - Curvas de secagem da espuma da folha do espinafre nas temperaturas de 50 (a), 60 (b) e 70 °C.





Fonte: Elaboração própria

As curvas de cinética da secagem da espuma da folha de espinafre apresentam alta proximidade para todos os experimentos. Este comportamento corrobora com os resultados obtidos na análise estatística, demonstrando que as variáveis de entrada, concentração do emulsificante e o tempo de agitação, não exerceram influência significativa na secagem em camada de espuma da folha do espinafre, nas condições estabelecidas no planejamento experimental.

Constatou-se que a variação do tempo de secagem foi decorrente da temperatura utilizada em cada experimento. Percebe-se que a elevação da temperatura provoca maior transferência de calor entre a camada de espuma e o ar, conseqüentemente maior evaporação de água, resultando na redução do teor de umidade e tempo de secagem.

Quando a secagem da espuma de espinafre foi submetida a 50 °C, o tempo necessário para reduzir o teor de água foi de 240, 150, 180 e 180 min, para os experimentos 1, 2, 3 e 4; já para 70 °C o tempo foi de 110, 120, 140 e 80 min para os experimentos 5, 6, 7 e 8 respectivamente, constatando - se que à medida que a temperatura aumenta o tempo de secagem diminui.

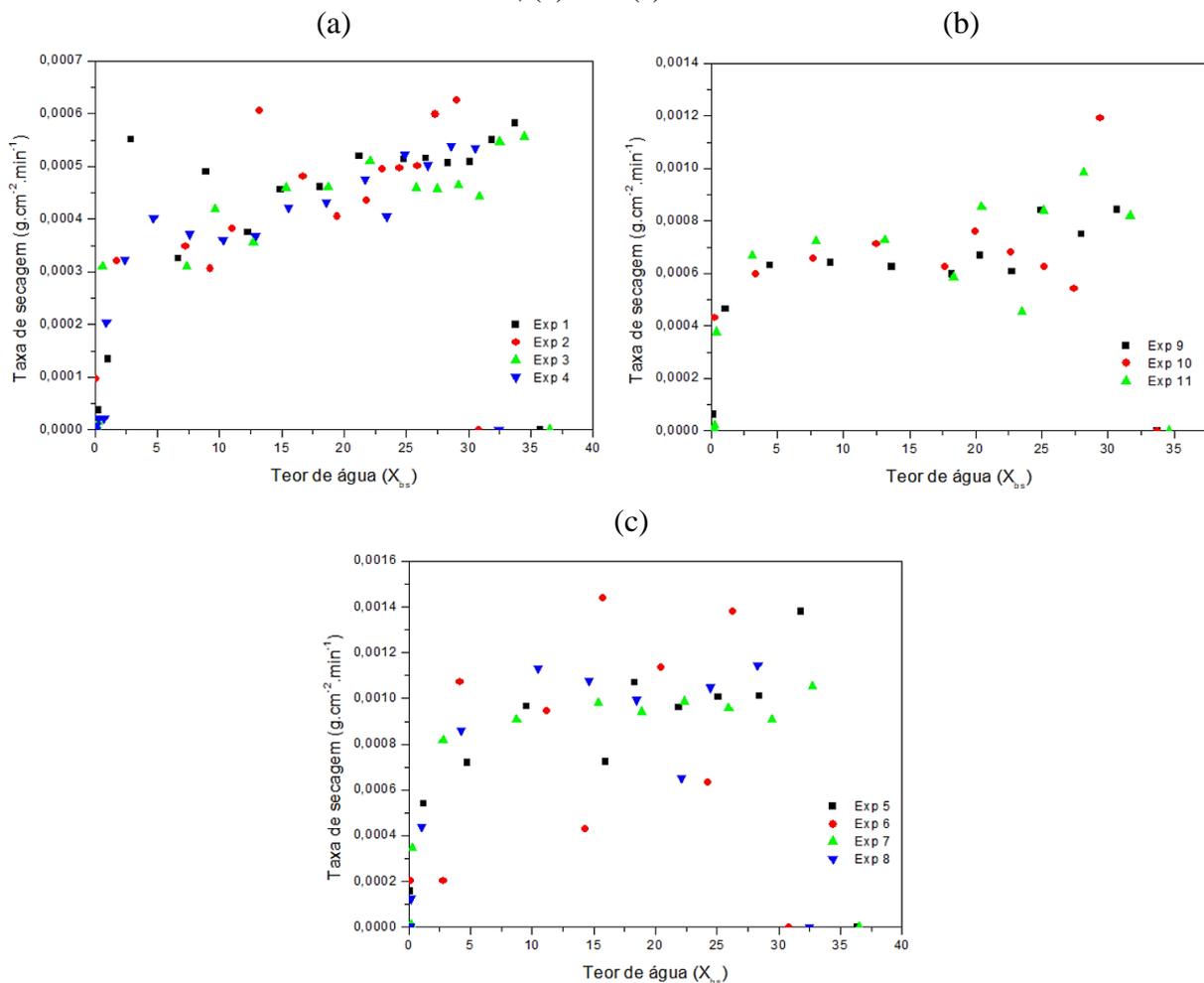
Uma boa reprodutibilidade foi constatada através das curvas ilustradas na Figura 7(c) para as condições do ponto central, que apresentaram tempo final de secagem entre 140 e 170 min, nos três experimentos.

Este mesmo comportamento foi verificado por Silva *et al.* (2023) ao trabalhar com a folha da couve (*Brassica oleracea* L.), Barros *et al.* (2019) ao desidratar cascas de kimo (*Cucumis metuliferus*) assim como Silva *et al.* (2022) ao desidratar berinjela (*Solanum melongena* L.).

Percebe-se também que todas as curvas de secagem apresentadas têm comportamento semelhante, apresentando períodos de taxa de secagem constante e decrescente.

Na Figura 8, são apresentadas as taxas de secagem ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$) em função da umidade em base seca (u_{bs}) para os experimentos nas temperaturas de 50 °C (a), 60 °C (b) e 70 °C (c), respectivamente.

Figura 8 - Taxa de secagem em função da umidade em base seca para os experimentos na temperatura de (a) 50, (b) 60 e (c) 70 °C.



Fonte: Elaboração própria

Pela análise das curvas de taxa de secagem observou-se que as maiores taxas de secagem foram apresentadas nos experimentos realizados na temperatura de 70 °C e a taxa foi reduzida na mesma proporção que a temperatura de secagem. Esse comportamento comprova o estudo de Keey (1992) que afirma que maiores temperaturas promovem uma taxa de secagem mais elevada. Além disso, observa-se um maior período de taxa constante seguido de período curto de taxa decrescente.

A taxa de secagem diminui continuamente com a diminuição do teor de umidade ou com o aumento do tempo de secagem (SACILIK e ELICIN, 2006).

Observou-se aumento considerável nas taxas de secagem quando temperaturas mais altas foram utilizadas na secagem da couve (Silva *et al.* 2023) e da hortelã-da-folha-miúda (Leite *et al.* 2023).

De acordo com Fernandes, Pê e Rocha (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.

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.

4.5 Ajuste matemático

O ajuste dos modelos matemáticos frente aos dados experimentais da secagem em camada de espuma do espinafre foi realizado utilizando, como critérios de seleção dos modelos, a análise

estatística, relativa a coeficiente de regressão não linear (R^2) alto e mais próximo de um (1,0) e o valor de erro padrão da estimativa (S) baixo e mais próximo de zero (OLIVEIRA *et al.*, 2020; SOUZA, 2021).

Os resultados dos ajustes dos modelos não-lineares estão apresentados na Tabela 6 para cada uma das faixas de temperaturas avaliadas na cinética de secagem.

Tabela 6 - Resultados dos ajustes aos modelos nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Modelo	Parâmetros							
	T (°C)	k	n	a	b	c	R ²	S
Newton	50	0,015730					0,984689	0,282341
	60	0,026359					0,982264	0,226470
	70	0,034597					0,980692	0,288637
Page	50	0,003296	1,382328				0,995850	0,076952
	60	0,004862	1,466926				0,995447	0,058529
	70	0,006595	1,489607				0,994741	0,079168
Page modificado	50	0,001669	1,531364	0,955603			0,996679	0,061619
	60	0,002329	1,647146	0,945546			0,996493	0,045102
	70	0,003952	1,623413	0,95668			0,995417	0,069020
Henderson & Pabis	50	0,017076		1,067834			0,987883	0,223801
	60	0,028586		1,074016			0,985234	0,188839
	70	0,037393		1,076174			0,983740	0,243436
Logarítmico	50	0,014684		1,130259		-0,07705	0,990900	0,168333
	60	0,025977		1,112253		-0,04761	0,987340	0,161315
	70	0,033250		1,120813		-0,05652	0,986756	0,198588
Midilli e Kucuk	50	0,001764	1,516052	0,957124	ns		0,996813	0,0603721
	60	0,002356	1,643574	0,945856	ns		0,996501	0,0449946
	70	0,004040	1,615995	0,957331	ns		0,995439	0,0686917

ns: não significativo ; k, n, a e b são parâmetros do modelo

Fonte: Elaboração própria

De acordo com resultados apresentados na Tabela 6, todos os modelos aplicados a cinética de secagem da espuma do espinafre apresentaram coeficiente de determinação (R^2) superiores a 0,98 para as temperaturas avaliadas. Conforme Araújo *et al.* (2017), valores de R^2 superiores a 0,98 indicam que os modelos matemáticos representam de maneira satisfatória o comportamento de

secagem. Sendo assim pode-se afirmar que os modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson & Pabis e Logarítmico se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais, com exceção do modelo de Midilli e Kucuk que apresentou o coeficiente **b** estatisticamente não significativo ($p < 0,05$) para todas as temperaturas, resultando no descarte do modelo.

As equações ajustadas dos modelos estatisticamente significativos são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Equações dos modelos matemáticos estatisticamente significativos à cinética de secagem.

Modelo	T (°C)	Equação do ajuste matemático
Newton	50	$RU = e^{(-0,015730t)}$
	60	$RU = e^{(-0,0226359t)}$
	70	$RU = e^{(-0,0334597t)}$
Page	50	$RU = e^{(-0,003296t^{1,382328})}$
	60	$RU = e^{(-0,004862t^{1,466926})}$
	70	$RU = e^{(-0,006595t^{1,489607})}$
Page modificado	50	$RU = 0,955603e^{(-0,0011669t)^{1,531364}}$
	60	$RU = 0,945546e^{(-0,002329t)^{1,647146}}$
	70	$RU = 0,956680e^{(-0,003952t)^{1,626413}}$
Henderson & Pabis	50	$RU = 1,067834e^{(-0,017076t)}$
	60	$RU = 1,074016e^{(-0,028586t)}$
	70	$RU = 1,076174e^{(-0,037393t)}$
Logarítmico	50	$RU = 1,130259e^{(-0,014684t)} - 0,077048$
	60	$RU = 1,112253e^{(-0,025971t)} - 0,047613$
	70	$RU = 1,120813e^{(-0,033250t)} - 0,056520$

RU: razão de umidade e t: tempo de secagem

Fonte: Elaboração própria

Considerando os critérios de escolha preestabelecidos, pode-se afirmar que os modelos de Page modificado e Page apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais da secagem em camada de espuma da folha do espinafre, com valores de $R^2 > 0,99$ e erro padrão (S) $< 0,08$.

Leite *et al.* (2023), Silva *et al.* (2023), trabalhando com hortelã-da-folha-miúda (*Mentha crispa*) e couve (*Brassica oleracea L.*) encontraram melhores ajustes e coeficientes de determinação elevados para o modelo de Page.

Silva (2021) e Martinazzo, Melo, Corrêa e Santos (2010), estudando respectivamente, folha da amoreira e folhas de capim-limão (*Cymbopogon citratus*) também verificaram que o modelo de Page Modificado foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Segundo Sousa *et al.* (2015), a determinação do modelo matemático depende da espécie de planta estudada.

Todos os modelos avaliados, mostraram que k (min^{-1}), que é a constante de secagem, eleva-se com o aumento da temperatura de secagem. Para Sousa *et al.* (2011), a constante k representa o efeito das condições externas de secagem e tem seu aumento linear com a elevação da temperatura do ar de secagem. Este mesmo comportamento foi verificado por Alves *et al.* (2021), ao avaliarem a cinética da secagem da casca de jaboticaba (*Myrciaria cauliflora Berg*) na faixa de temperaturas 45, 50 e 55 °C por camada de espuma, aos modelos de Henderson & Pabis e Logarítmico e verificado também por Melo *et al.* (2013), para a polpa do fruto do mandacaru. Já o parâmetro n , segundo Misra e Brooker (1980) representa a resistência interna do produto à secagem. Em todos os modelos avaliados o valor de k é bastante irrelevante comparado com o valor de n , indicando, que o processo é totalmente dependente da resistência interna do produto à secagem.

No presente estudo foi observada uma correlação entre o parâmetro n e a temperatura aplicada no ar de secagem para os modelos de Page, Page modificado e Midilli, o valor de n aumenta ao elevar a temperatura. Comportamento também observado por Araújo *et al.* (2017) em seu estudo sobre secagem de amendoim, em que os autores destacam que o parâmetro n expresso no modelo de Page, Page modificado e Midilli reflete a resistência interna do produto à secagem.

Verifica-se que o parâmetro a do modelo de Henderson & Pabis aumentou com o aumento da temperatura de secagem mesmo. Entretanto, para o modelo Logarítmico o parâmetro a não apresentou correlação com a temperatura, ocorreu variação irrelevante com aumento da temperatura.

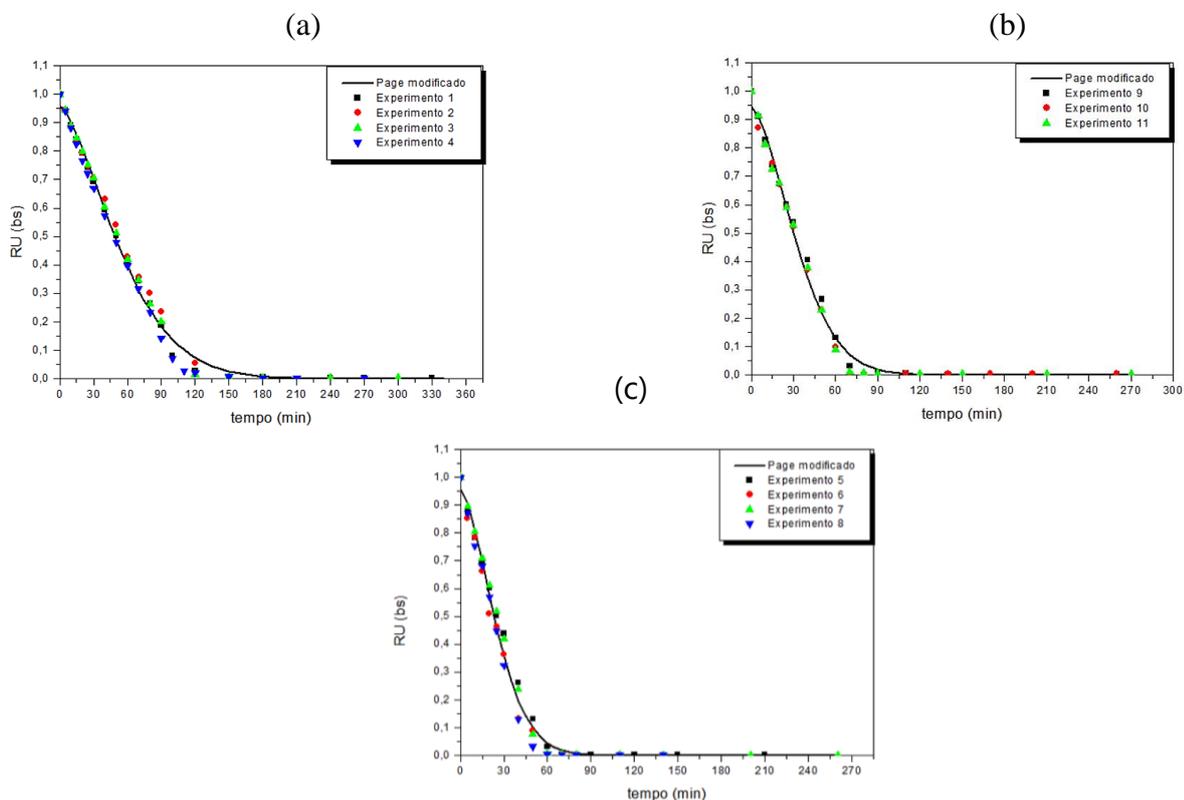
Os ajustes para os modelos de Newton, Henderson & Pabis e Logarítmico também foram satisfatórios e tiveram coeficientes de determinação superiores a 0,9806, porém apresentaram maiores

valores de erro padrão 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.

Diante dos resultados obtidos, constatou-se que Page modificado foi o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais apresentando os maiores coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,9954 e 0,9967, os menores erros padrão (S), variando entre 0,0451 e 0,0690 para a faixa de temperatura de 50 a 70 °C, o que indica que este modelo representa satisfatoriamente o fenômeno da secagem da espuma de espinafre.

Na Figura 9 estão ilustradas as curvas ajustadas com o modelo matemático de Page modificado aos dados experimentais da cinética de secagem da folha do espinafre de 50, 60 e 70 °C.

Figura 9 - Ajuste para o modelo de Page modificado nas temperaturas (a) 50 °C, (b) 60 °C e (c) 70 °C para as diferentes concentrações de espumantes e tempo de agitação.



Fonte: Elaboração própria

5. CONCLUSÕES

Mediante os resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

As variáveis de entrada (concentração do emulsificante e tempo de agitação) não exerceram influência estatisticamente significativa para o nível de 95% de confiança sobre os parâmetros analisados da espuma do espinafre, com exceção da estabilidade.

O aumento da temperatura promoveu uma redução significativa no tempo de secagem da espuma do espinafre. O modelo Page modificado foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais e, portanto, o mais indicado para representar a cinética de secagem em camada de espuma da folha do espinafre nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

A melhor condição de secagem, em termos operacionais, ocorre ao se trabalhar com temperatura de 70 °C, 4% de concentração de emulsificante e tempo de agitação de 8 min, obtendo-se um tempo de secagem de 80 min e teor de água (bs) de 7,4%.

Por fim, a secagem em camada de espuma é viável para obtenção do pó da folha de espinafre, visto que ao finalizar o processo foi obtido um produto mais estável, podendo ser aplicado em formulações nas indústrias alimentícias e farmacêuticas.

6. REFERÊNCIAS

AKPINAR, E. K. Modelagem matemática do processo de secagem em camada fina sob sol aberto de algumas plantas aromáticas. **Jornal de Eng. de Alimentos**, v. 77, p. 864–870, 2006.

ALVES, H. G.; ALMEIDA, R. L. J.; SILVA, D. S.; FREIRE, V. A.; ARAÚJO, V. S.; SANTIAGO, A. M.; CONRADO, L. de S.; GALDINO, P. O.; ALMEIDA, M. M.; MARSIGLIA, W. I. M. de L. Kinetic study of the drying of the bark of jabuticaba (*Myrciaria Cauliflora* Berg) using empirical and semi-empirical models. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, 2021.

AMARO, L. F. C. G. M. **Caracterização da Eficiência anti – radicalar e do teor em compostos fenólicos do espinafre da Nova Zelândia (*Tetragonia tetragonoides*)**. Universidade de Porto, Porto, 2009.

ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. R.; OLIVEIRA, A. N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, p. 4-9, 2017.

AZEVEDO, F. L. A. A. **Valor nutricional, capacidade antioxidante e utilização de folhas de espinafre (*Tetragonia tetragonoides*) em pó como ingrediente de pão de forma**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. H. H., & VARIDI, M. Foam-mat drying of shrimp: characterization and drying kinetics of foam. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 15, n. 3, p. 159-165, 2013.

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.

BARBOSA, C. K. R.; FINGER, F. L.; CASALI, V. W. D. Handling and postharvest shelf life of ora-pro-nobis leaves. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 37, n. 3 p. 307-311, 2015.

BARROS, S. L.; CÂMARA, G.B.; LEITE, D. D. F.; SANTOS, N. C.; SANTOS, F. S.; SOARES, T. C.; LIMA, A. R. N.; SOARES, T. C.; OLIVEIRA, M. N.; VASCONCELOS, U. A. A.; ALBUQUERQUE, A. P.; QUEIROZ, A. J. M. Modelagem matemática da cinética de secagem de cascas de kino (*Cucumis metuliferus*). **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Relatório Final de Perdas e Desperdícios de Alimentos**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/perdas-e-desperdicio-de-alimentos/publicacoes-em-destaque/relatorio-final-perdas-e-desperdicio/view>>. Acesso em: 02 nov. 2023.

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. Diário Oficial da União, 2005a. Disponível em <<http://www.saude.rj.gov.br/comum/code/MostrarArquivo.php?C=MjA0NA%2C%2C>>. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Resolução de Diretoria Colegiada – **RDC nº 263**, de 22 de setembro de 2005. Dispõe sobre regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. Diário Oficial da União, 2005b. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_263_2005_.pdf/2b494d48-0d39-4c8d-84d1-e20ec6e9190f>. Acesso em: 10 nov. 2024.

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

CASTRO, D. S.; SILVA, L. M. M.; MOREIRA, I. S.; SOUSA, F. C.; SILVA, W. P.; ALMEIDA, F. A. C. Análise e descrição matemática da secagem de polpa de taturubá (*Pouteriamacrophylla lam Eyma*) em camada fina. **Engevista**, v. 18, n. 2, p. 309-317, 2016.

COSTA, I. I. S. **Secagem da folha do manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) pelo método de camada de espuma**. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

COSTA, I. F. G.; GERALDI, C. A. Q.; GUEDES, S. F.; ALVES, R. A. G.; LOSS, R. A. Cinética da secagem em camada de espuma da pitaia rosa de polpa vermelha. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 12, p. 213-220, 2021.

CHEROBIN, A. K.; AMARAL, A. M. P.; MORRONI, L. S.; CAVALHEIRO, D.; SENN, G.A.R. Spinach Extract as a source of nitrite in fresh sausages: quality attributes and stability during refrigerated storage. **Science and Food Technology**, 2023.

DANTAS, S. C. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying of spinach leaves in convective dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 32, p. 112-125, 2009.

ERENTURK, S.; GULABOGLU, M. S.; GULTEKIN, S. The thin layer drying characteristics of roseship. *Biosystems Engineering, Oxford*, v. 89, n. 2, p.159-166, 2004.

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.

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.

FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 855-862, 2012.

FERREIRA, O. M.; MURAKAMI, C. M.; BONZI, J. I. D. S.; WERLE, L. O.; MARTELI, S. M.; GALANTE, R. M. Secagem da raiz *in natura* de *Chaptalia nutans*: influência da temperatura e avaliação de modelos matemáticos. **Peer Review**, vol. 5, n. 9, 2023.

FRANCO, T. S. **Desidratação de suco de yacon pelo método de camada de espuma**. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

IAL. Instituto Adolfo Lutz.; **Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo**, 4^a ed., 2008.

KEEY, R. B. **Drying of Loose and Particulate Materials**. Hemisphere Publishing Corporation. Cap. 8. 1992. Disponível em: <<https://goo.gl/LPRmc5>>. Acessado em: 05 nov. 2023.

LEITE, A. C. N.; CAVALCANTE, J. A.; COSTA, N. A.; PINHEIRO, W. S. Cinética de secagem em camada de espuma da *Mentha crisper* e ajuste de modelos matemáticos. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, v. 30, n. 1, p. 1-18, 2023.

LEMOS, C. D. L.; FERREIRA, J.S.; ALENCAR, D.D.O.; ANDRÉ, A. M. C. N.; ALMEIDA, R.D. **Cinética de secagem do espinafre (*Tetragonia tetragonoides*)**. Anais I Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências - CONAPESC. Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/17893>>. Acesso em: 25 jul. 2024.

LIMA, A. C. F.; OLIVEIRA, B. F.; SILVA, W. K. V.; BONFIM, K.S.; NÓBREGA, M. M. G.; SILVA, Y.T. F.; CAVALCANTE, J. A.; CORNÉLIO, M. L. Secagem em camada de espuma da folha do noni (*Morinda citrifolia L.*). **Revista Observatorio de La Economia LatinoAmericana**, v. 22, n. 1. p. 345-370, 2024.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-Layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75-97, 1996.

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.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. de C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 301-306, 2007.

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, 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.

MELO, K. S.; FIGUEREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; FERNANDES, T. K. S.; BEZERRA, M. C. T. Secagem de espuma da polpa do fruto mandacaru: experimentação, ajustes de modelos matemáticos. **Revista Caatinga** v. 26, n. 2, p.10-17, 2013.

MEI LING, N.; SULAIMAN, R. Development of Beetroot (*Beta Vul garis*) 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.

MORAES, M. R. L. D. **Secagem em camada de espuma (*foam mat drying*) das folhas do mastruz (*Chenopodium ambrosioides* L.)**. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

OLIVEIRA, B. F.; Negreiros, J. K. S.; BONFIM, K. S.; CAVALCANTE, J. A.; PINTO, M. F.; COSTA, N. A. Modelagem matemática da cinética em camada de espuma da folha da graviroleira (*Annona muricata* Linn) e caracterização do pó obtido. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, 2020.

OLIVEIRA, W. E. S. **Determinação dos parâmetros para a secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) das folhas da arruda (*Ruta graveolens* L.)**. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

ONOIKO, O. B.; ZOLOTAREVA, O. K. Compostos bioativos e potencial farmacognóstico de *Tetragonia tetragonoídes*. **Biotecnologia Acta**, v. 17, n. 1, 2024.

PAULA, N. R. F.; BOAS, E. V. B. V.; RODRIGUES, L. J.; CARVALHO, R. A.; PICCOLI, R. H. Qualidade de produtos minimamente processados e comercializados em gôndolas de supermercados nas cidades de Lavras-MG, Brasília-DF e São Paulo-SP. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, p. 219-227, 2009.

PEREIRA, A. S.; Shitsuka, D. M.; Parreira, F. J.; Shitsuka, R. Metodologia da pesquisa científica. Santa Maria, RS: UFSM, 119 p., 2018.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

ROCHA, D. R. C.; PEREIRA JÚNIOR, G. A.; VIEIRA, G.; PANTOJA, L.; SANTOS, A. S.; PINTO, N. A. V. D. Macarrão adicionado de ora -pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller) desidratado. **Alimentos e Nutrição**, v. 19, n. 4, p. 459-465, 2008.

SACILIK, K. L.; KESKIN, R.; ELICIN, A. K. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. **Journal of food Engineering**, v. 73, n. 3, p. 231-238, 2006.

SANTOS FILHO, A. S.; VELOSO, N. C.; CARELI, R. T.; CANO-CHAUCA, M. N.; COSTA, C. A.; OLIVEIRA, N. J. F.; CAMPOS, J. A. Qualidade físico-química e microbiológica de hortaliças desidratadas ao sol e em secador laboratorial. **HOLOS**, v. 5, n. 34, p. 91-100, 2018.

SILVA, Q. A.; NÓBREGA, M. M. G.; MORAIS, M. A. P.; OLIVEIRA, B. F.; LOPES, J. D.; SILVA, Y. T. F.; CAVALCANTE, J. A. Cinética de secagem, propriedades físico-químicas e compostos bioativos da couve folha (*Brassica oleracea* L.) seca em camada de espuma. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 9, p. 11222-11247, 2023.

SILVA, J. R. B.; CAMPOS, A. R. N.; SANTANA, R. A. C.; DANTAS, D. L.; MACEDO, A. D. B.; SOUSA, A. P. M.; MALAQUIAS, A. B.; ALBUQUERQUE, T. N.; SILVA, G. B.; SANTOS, A. X. Cinética de secagem da Berinjela (*Solanum Melongena* L.) em estufa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, 2022.

SILVA, P. B. **Secagem da folha da amoreira negra (*Morus nigra* L.) pelo método de camada de espuma (foam mat drying)**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

SILVA, P. C. G. **Secagem da folha de guajiru (*Chrysobalanus icaco* L.) pelo método de camada de espuma (foam-mat drying)**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

SOUSA, F. C.; MARTINS, J. J. A.; ROCHA, A. P. T.; GOMES, J. P.; PESSOA, T.; MARTINS, J. N. Predição de modelos sobre a cinética de secagem de folhas de Ziziphus joazeiro Mart. **Revista Brasileira de plantas medicinais**, v. 17, p. 195-200, 2015.

SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; SILVA, L. M. M.; MARTINS, J. J. A.; GOMES, J. P.; ROCHA, A. P. T. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 26, n. 2, 108-112, 2011.

SOUZA, J. B. P. **Secagem em camada de espuma das folhas de alecrim (*Rosmarinus officinalis* L.)**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 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.

ZANATTA, C. L.; SCHLABITZ C.; ETHUR, E. M. Avaliação físico-química e microbiológica de farinhas obtidas a partir de vegetais não conformes à comercialização. **Alimentos e Nutrição**, v. 21, n. 3, p. 459-468, 2010.

6.2 ARTIGO 2 - CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DA FOLHA DE ESPINAFRE OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

CHARACTERIZATION OF SPINACH LEAF POWDER OBTAINED BY DRYING ON A LAYER OF FOAM

RESUMO

O espinafre (*Tetragonia tetragonoides* L.) é uma hortaliça folhosa que quando adicionada à dieta contribui com o aporte nutricional de fibras, vitaminas, proteínas e minerais, rico em compostos bioativos com efeitos reconhecidos na prevenção de doenças crônicas e distúrbios metabólicos. Possui alta perecibilidade, devido ao elevado teor de umidade, por isso tende a deteriorar-se em poucos dias, necessitando de um método de conservação, como a secagem, uma alternativa viável para reduzir o teor de água, manter a estabilidade e prolongar sua vida útil do produto. O objetivo deste estudo foi caracterizar o pó da folha de espinafre obtido por secagem em camada de espuma, quanto aos aspectos físico-químicos, colorimétrico e teor de fenólicos totais. Para caracterizar o pó da folha de espinafre foram feitas as seguintes análises: pH; sólidos solúveis totais (SST); acidez titulável total (ATT); atividade de água (A_w); umidade; cinzas; proteínas; lipídios; carboidratos; cor e compostos fenólicos totais (CFT). Os resultados, analisados indicaram que os pós obtidos apresentaram caráter pouco ácido, elevação do teor de acidez após a secagem e alto teor de sólidos solúveis variando de 36 a 44 °Brix. A atividade de água ($< 0,6$) e a umidade de acordo com o preconizado pela legislação ($\leq 15\%$), favorecendo a conservação e o armazenamento. Teor de compostos fenólicos significativos (1457,81 a 2056,88 mg EAG 100 g⁻¹), coloração verde, variando para tons mais escuro ao elevar a temperatura de secagem de 50 para 70 °C. O teor de proteínas, lipídios, cinzas e carboidratos foi concentrado, sendo o de lipídios influenciado pela adição do emulsificante. Desse modo conclui-se que os pós de folhas de espinafre desidratados por camada de espuma mostram-se promissores para aplicação em novas formulações, nas indústrias alimentícia e farmacêutica, além disso, considerando o tempo e o custo elevado do processo de liofilização, a secagem em camada de espuma torna-se uma alternativa viável e de baixo custo para a obtenção do pó da folha de espinafre.

Palavras-chave: *Tetragonia tetragonoides*, desidratação, fenólicos.

ABSTRACT

Spinach (*Tetragonia tetragonoides*) is a leafy vegetable that, when added to the diet, contributes to the nutritional intake of fiber, vitamins, proteins and minerals, and is rich in bioactive compounds with recognized effects in the prevention of chronic diseases and metabolic disorders. It is highly perishable due to its high moisture content, so it tends to deteriorate in a few days, requiring a preservation method, such as drying, which is a viable alternative to reduce water content, maintain stability and extend the shelf life of the product. The objective of this study was to characterize the spinach leaf powder obtained by foam drying, regarding its physicochemical, colorimetric and total phenolic content aspects. The following analyses were performed to characterize the spinach leaf powder: pH; total soluble solids (TSS); total titratable acidity (TTA); water activity (A_w); moisture; ash; proteins; lipids; carbohydrates; color and total phenolic compounds (TPC). The results indicated that the powders obtained presented a slightly acidic character, increased acidity content after drying and high soluble solids content ranging from 36 to 44 °Brix. The water activity (< 0.6) and moisture content were in accordance with the legislation ($\leq 15\%$), favoring conservation and storage. Significant phenolic compound content (1457.81 to 2056.88 mg EAG 100 g^{-1}), green coloration, varying to darker tones when increasing the drying temperature from 50 to 70 °C. The protein, lipid, ash and carbohydrate content was concentrated, with the lipid content being influenced by the addition of the emulsifier. Thus, it is concluded that spinach leaf powders dehydrated by foam layer show promise for application in new formulations in the food and pharmaceutical industries. Furthermore, considering the time and high cost of the freeze-drying process, foam layer drying becomes a viable and low-cost alternative for obtaining spinach leaf powder.

Keywords: *Tetragonia tetragonoides*, dehydration, phenolics.

1 INTRODUÇÃO

A ingestão adequada de vegetais diariamente, é reconhecida há anos, como forma de promover saúde e reduzir o risco de doenças, sendo assim o consumo de hortaliças folhosas é relevante para este fim, por constituir fontes naturais de fibras alimentares, vitaminas, minerais e fitoquímicos (BROUVER-BROLSMA *et al.*, 2020; JÚNIOR *et al.*, 2024).

O espinafre (*Tetragonia tetragonoides*), também conhecido como espinafre Nova Zelândia, é uma hortaliça folhosa que quando adicionada à dieta, contribui com o aporte nutricional de fibras, vitaminas, proteínas e minerais, especialmente cálcio e ferro, além de ser rico em compostos bioativos (PANDJAITAN *et al.*, 2005; PIENIZ *et al.*, 2009), com efeitos reconhecidos na prevenção de doenças crônicas e distúrbios metabólicos (ONOIKO e ZOLOTAREVA, 2024; ZANATTA; SCHLABITZ; ETHUR, 2010; DI FAN *et al.*, 2011).

Como outras hortaliças, o espinafre possui alta perecibilidade, devido ao elevado teor de umidade, por isso tende a deteriorar-se em poucos dias, perdendo quase todos os seus atributos de qualidade exigidos (cor, textura e integridade), podendo resultar num desperdício total. Por isso, necessita de um método de conservação, como a secagem, que promove simultaneamente a redução da umidade e o aumento da vida útil, favorecendo assim a diminuição dos custos com embalagem, armazenamento, transporte, bem como tornando-o disponível por maior período de tempo. Esse método baseia-se na remoção de água na forma de umidade de um produto por evaporação ou sublimação, por meio da aplicação de calor em condições controladas (CARDOSO *et al.*, 2022).

Dentre as formas de secagem tem-se a camada de espuma (*foam-mat drying*) técnica em que alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em espumas estáveis através da adição de agentes emulsificantes e aeração em bateadeira (CABRAL FILHA *et al.*, 2023). Devido ao aumento da área da superfície em contato com o ar quente, a passagem e remoção da água é facilitada, o que diminui as temperaturas de secagem, e da mesma forma o tempo requerido para a secagem (RIGUETO *et al.*, 2018). Como o tempo e temperaturas são menores, consequentemente há maior conservação das características originais do alimento (ROCHA *et al.*, 2023).

O resultado da secagem em camada de espuma é um pó com maior estabilidade química e microbiológica, podendo ser adicionado para enriquecer produtos já existentes ou utilizado como insumo em novos produtos da indústria alimentícia (OLIVEIRA *et al.*, 2020a).

Muitos estudos têm empregado essa técnica para desidratar uma ampla variedade de produtos, como folha do noni (LIMA *et al.* 2024); hortelã-da-folha-miúda (LEITE *et al.*, 2023); folha de couve (SILVA *et al.*, 2023); folha de alecrim (SOUZA, 2021); folha da graviola (OLIVEIRA *et al.* 2020a) e talos e folhas de cenoura (NUNES *et al.*, 2019).

Estudos revelam que a incorporação do pó de espinafre em formulações alimentícias está em crescimento, devido a composição de nutrientes e compostos bioativos, que tem promovido a diversificação da sua aplicabilidade. Sebastião (2021) e Ruschel *et al.* (2013) utilizaram o pó de espinafre para colorir naturalmente, cereal matinal e biscoito waffle, ambos comprovaram a boa aceitação sensorial dos produtos obtidos. Já Ferreira *et al.* (2020) e Azevedo (2012) usaram o pó do espinafre como substituto parcial da farinha de trigo afim de enriquecer nutricionalmente o biscoito tipo *cookies* e o pão de forma.

Algumas técnicas alternativas para obtenção do pó da folha do espinafre já foram avaliadas como a utilização da secagem por convecção forçada, micro-ondas e liofilização, porém nenhum trabalho até o momento avaliou o uso da secagem por camada de espuma em espinafre. Assim, o objetivo deste estudo foi caracterizar o pó da folha de espinafre obtido por secagem em camada de espuma, quanto aos aspectos físico-químicos, colorimétrico e teor de fenólicos totais.

2 METODOLOGIA

As análises e ensaios experimentais foram realizados nos Laboratórios de Termodinâmica, Bioengenharia, Operações Unitárias do Departamento de Engenharia Química (DEQ), nos Laboratórios de Análises Químicas e de Alimentos (LAQA) e Tecnologia de Alimentos (LTA) do Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, pertencentes ao Centro de Tecnologia (CT) e no Laboratório de Operações Unitárias do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional (CTDR), todos da Universidade Federal da Paraíba / João Pessoa - PB.

2.1 Matéria-prima

O espinafre foi obtido fresco no comércio local da cidade de João Pessoa- PB. As amostras foram avaliadas visualmente, sendo utilizadas as folhas verdes, descartando os talos, as folhas amareladas e com danos mecânicos ou causados por pragas. Posteriormente foram lavadas em água corrente e imersas em solução de hipoclorito de sódio (100 mg L^{-1}) por 10 minutos, seguido de enxágue com água corrente para eliminar o cloro residual, sendo o excesso de umidade retirado com papel toalha. Esse procedimento foi realizado de acordo com Resolução RDC nº 218/2005 da ANVISA (BRASIL, 2005a), que regulamenta procedimentos higiênico-sanitários para manipulação de alimentos e bebidas preparados com vegetais.

2.2 Obtenção do derivado vegetal

O derivado vegetal formado por folhas de espinafre com água destilada foi preparado utilizando a proporção de 1:2 (m/v): 50 g das folhas de espinafre para 100 mL de água destilada. Essa mistura foi triturada em um liquidificador industrial da marca Metvisa 2 L, com velocidade constante de 1800 rpm por 1 min em potência máxima 1000 W, até a obtenção de uma mistura homogênea.

2.3 Produção da espuma

A espuma foi produzida por agitação mecânica em batedeira doméstica (modelo Planetária Deluxe da marca Arno) em velocidade máxima e em potência de 600 W, adicionando-se o emulsificante Portogel® ao derivado vegetal.

2.4 Obtenção do pó da folha de espinafre por camada de espuma

As espumas foram dispostas em bandejas de inox, dimensões 37 x 22 cm, com espessura fixa de 5 mm e colocadas em uma estufa com circulação e renovação de ar (Lucadema LUCA 80/528), nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. A redução do teor de água foi determinada por pesagem da amostra em balança semi-analítica, até peso constante. 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.

A secagem foi realizada mediante um planejamento experimental fatorial completo $2^3 + 3$ pontos centrais, totalizando 11 experimentos, conforme apresentado na Tabela 1. A concentração de emulsificante (2, 3 e 4%), tempo de agitação (6, 7 e 8 min) e temperatura (50, 60 e 70 °C) são as variáveis do processo.

Tabela 1 - Matriz planejamento experimental

Experimento	Variáveis independentes		
	C (%)	t _{ag} (min)	T (°C)
01	2 (-1)	6 (-1)	50 (-1)
02	4 (+1)	6 (-1)	50 (-1)
03	2 (-1)	8 (+1)	50 (-1)
04	4 (+1)	8 (+1)	50 (-1)
05	2 (-1)	6 (-1)	70 (+1)
06	4 (+1)	6 (-1)	70 (+1)
07	2 (-1)	8 (+1)	70 (+1)
08	4 (+1)	8 (+1)	70 (+1)
09	3 (0)	7 (0)	60 (0)
10	3 (0)	7 (0)	60 (0)
11	3 (0)	7 (0)	60 (0)

C: concentração do emulsificante; tag: tempo de agitação; T: temperatura de secagem.

Fonte: Elaboração própria

2.5 Obtenção do espinafre em pó liofilizado

Para comparações com o pó da folha de espinafre obtido pelo método de secagem em camada de espuma, foi realizada a caracterização do pó da folha do espinafre obtido por liofilização, uma vez que esse processo contribui para uma maior conservação das propriedades da matéria-prima por operar em baixas temperaturas.

O derivado vegetal de espinafre foi congelado, em freezer doméstico, e levado ao liofilizador (Terroni, modelo LS3000), para o processo de desidratação por 72 h, atingindo pressão final de 100 mmHg e temperatura do condensador de -50 °C.

2.6 Caracterização do espinafre *in natura* e em pó obtido por secagem em camada de espuma e por liofilização

Com a finalidade de caracterizar o espinafre *in natura* e em pó as seguintes determinações foram realizadas: pH, sólidos solúveis totais (SST), acidez titulável total (ATT), atividade de água (A_w), umidade, cinzas, proteínas, lipídios, carboidratos, cor e compostos fenólicos totais (CFT), este último apenas para o pó. Todas as análises foram realizadas em triplicata e de acordo com a metodologia descrita no manual do Instituto Adolfo Lutz (2008).

2.6.1 Análises físico – químicas e química

O teor de acidez total titulável (ATT) foi determinado através de método titulométrico com solução padronizada de NaOH 0,1 N até pH 8,4 e os resultados expressos em g de ácido cítrico por 100 g da amostra (IAL, 2008); potencial hidrogeniônico (pH) através de método potenciométrico com medidor de pH da marca Testo 206, previamente calibrado com solução tampão de pH 4,0 e 7,0 (IAL, 2008); teor de sólidos solúveis (SST), avaliado por leituras em refratômetro de bancada por método refratométrico com os resultados expressos em °Brix (IAL, 2008); Enquanto que, para determinação da atividade de água (A_w), realizou-se leitura por medição direta no analisador de atividade de água Novasina LabMaster-aw® em que as amostras foram colocadas em cápsulas, posteriormente, acondicionadas no aparelho para realização da leitura.

2.6.2 Preparo do extrato

Para a extração, foram pesados aproximadamente 2 g de cada amostra, adicionados 50 mL de metanol e as soluções foram submetidas à sonicação por 20 min, posteriormente colocadas na mesa agitadora por 2 h antes de serem filtradas em funil analítico com papel filtro qualitativo (80 g/m²) e secas em estufa de circulação de ar (Lucadema, LUCA – 80/528) a 35 °C. Logo após, com metanol, foi preparado o extrato na concentração de 5 mg/mL.

O extrato foi armazenado em frasco de vidro âmbar, ao abrigo da luz, à temperatura ambiente (25 °C) e refrigerado até o momento de sua utilização para a determinação de fenólicos totais.

2.6.3 Análise de compostos fenólicos

Os compostos fenólicos totais foram quantificados pelo método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, descrito por Singleton, Orthofer e Lamuela-Raventos (1999) com pequenas modificações, em triplicata, utilizando ácido gálico como padrão. Uma alíquota de 300 μL do extrato foi adicionada a um tubo de ensaio contendo 60 μL do reagente de Folin-Ciocalteu. Após 1 minuto de agitação, foi adicionado 2.460 μL de água destilada e 180 μL de carbonato de sódio a 15%. Os tubos foram homogeneizados e guardados ao abrigo da luz por duas horas. Após esse período foi feita a leitura de absorvância a 760 nm em um espectrofotômetro UV-visível (Thermo Fisher Scientific, modelo Evolution 60S) juntamente com o controle que continha somente água e os reagentes. Para calcular o teor dos fenólicos totais contido nas amostras, utilizou-se uma curva padrão de ácido gálico (GAE), com base em uma curva de calibração com concentrações de ácido gálico que variaram de 0 a 20 $\mu\text{g mL}^{-1}$. A quantificação de fenólicos totais foram expressos como média \pm desvio-padrão em mg equivalente de ácido gálico (EAG) por 100 g de pó.

A equação da reta obtida igual a $y = 0,0858x - 0,0029$, foi utilizada para determinar os compostos fenólicos totais presentes nos extratos metanólicos avaliados. O coeficiente de determinação de regressão linear (R^2) apresentou correlação positiva ($R^2 = 0,986$), entre absorvância e a concentração de extrato utilizada (mg/mL).

2.6.4 Análise da composição centesimal

Para análise da composição centesimal, realizou-se avaliação do teor de umidade por método gravimétrico através da secagem direta da amostra em estufa (Lucadema LUCA 80/100) a 105 $^{\circ}\text{C}$ (IAL, 2008). A determinação do teor de cinzas foi realizada por método gravimétrico com incineração do material em forno tipo mufla (ElektroTherm LM 312-10) a 550 $^{\circ}\text{C}$ (IAL, 2008). Para quantificação de lipídios totais utilizou-se o método Bligh e Dyer, através de pesagem da amostra com posterior acréscimo de metanol, clorofórmio e água destilada (IAL, 2008).

As amostras foram analisadas quanto ao teor de proteínas de acordo com o método Kjeldahl que consiste na determinação do nitrogênio total. O fator de conversão utilizado para

a obtenção de proteínas foi de 6,25, multiplicado pelo valor de nitrogênio total (IAL, 2008). A concentração total de carboidratos foi calculada por diferença.

2.6.5 Análise colorimétrica

A cor foi determinada em leitura direta usando o colorímetro (Konica Minolta Sensing CR 400), previamente calibrado com uma placa de cerâmica branca padrão, pelo uso do sistema CIELAB, que expressa a cor por meio dos parâmetros L*, a*, b*, C* e °h.

2.7 Análise estatística

A análise estatística dos resultados obtidos, quanto aos parâmetros avaliados para o pó da folha de espinafre, foi realizada empregando-se a análise de variância seguido do delineamento inteiramente casualizado com a comparação entre médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando o programa computacional ASSISTAT[®] versão 7.7. Todas as análises foram feitas em triplicata.

Para a análise estatística do planejamento experimental fatorial foi utilizado o programa Statistica[®] 7.0 com a finalidade de verificar os efeitos principais e suas interações das variáveis independentes sobre variáveis respostas e para análise de variância (ANOVA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2, apresenta os resultados obtidos para a caracterização físico-química do espinafre *in natura* e em pó obtido por secagem em camada de espuma (E1 a E11) e por liofilização.

Tabela 2 - Caracterização da folha *in natura* do espinafre e em pó.

Experimentos / condições	pH	SST (°Brix)	Continua	
			ATT (g de ácido cítrico/100g)	Aw
E1 (2%, 6 min, 50 °C)	5,53 ^f ± 0,005	40 ^{bc} ± 0,00	1,44 ^{ab} ± 0,03	0,43 ^b ± 0,003
E2 (4%, 6 min, 50 °C)	5,65 ^e ± 0,014	39 ^c ± 0,00	1,40 ^b ± 0,03	0,39 ^d ± 0,001
E3 (2%, 8 min, 50 °C)	5,62 ^e ± 0,009	40 ^{bc} ± 0,00	1,44 ^{ab} ± 0,03	0,47 ^a ± 0,000
E4 (4%, 8 min, 50 °C)	5,65 ^e ± 0,005	40 ^{bc} ± 0,00	1,44 ^{ab} ± 0,03	0,48 ^a ± 0,001

Tabela 2 - Caracterização da folha *in natura* do espinafre e em pó.

Experimentos / condições	pH	SST (°Brix)	ATT (g de ácido cítrico/100g)	Conclusão
				Aw
E5 (2%, 6 min, 70 °C)	5,93 ^a ± 0,005	38 ^d ± 0,00	1,34 ^{bc} ± 0,03	0,29 ^f ± 0,006
E6 (4%, 6 min, 70 °C)	5,86 ^b ± 0,009	44 ^a ± 0,00	1,27 ^{cd} ± 0,03	0,38 ^d ± 0,001
E7 (2%, 8 min, 70 °C)	5,74 ^c ± 0,005	44 ^a ± 0,00	1,51 ^a ± 0,03	0,36 ^e ± 0,004
E8 (4%, 8 min, 70 °C)	5,82 ^b ± 0,005	36 ^e ± 0,00	1,19 ^d ± 0,03	0,29 ^f ± 0,001
E9 (3%, 7 min, 60 °C)	5,68 ^d ± 0,005	38 ^e ± 0,00	1,27 ^{cd} ± 0,03	0,40 ^c ± 0,002
E10 (3%, 7 min, 60 °C)	5,76 ^c ± 0,008	44 ^d ± 1,15	1,40 ^b ± 0,03	0,38 ^d ± 0,000
E11 (3%, 7 min, 60 °C)	5,65 ^e ± 0,005	44 ^a ± 0,00	1,44 ^{ab} ± 0,03	0,40 ^c ± 0,000
Liofilizado	5,74 ± 0,005	42 ± 0,00	1,25 ± 0,06	0,47 ± 0,002
<i>In natura</i>	6,00 ± 0,03	4,0 ± 0,0,0	0,75 ± 0,02	0,998 ± 0,01

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaboração própria

O pH é um parâmetro importante pois auxilia na avaliação do grau de deterioração de alimentos, no qual um valor de pH mais ácido ajuda na conservação do mesmo, assim como a diminuição da atividade de água, que inibem o crescimento microbiano (Pinto, Landgraf e Franco, 2019). É parâmetro intrínseco dos alimentos e está relacionado com a retenção de sabor e odor e conservação geral do produto (Silva *et al.*, 2023).

Com relação ao pH verifica-se que em todas as condições os pós apresentaram caráter levemente ácidos ($\text{pH} > 4,5$), variando de 5,53 a 5,93, sendo significativamente afetados pela temperatura ($p < 0,05$). Maiores temperaturas de secagem conduziram a maiores valores de pH, conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 2.

Os valores de pH encontrados para o pó do espinafre tanto na secagem em camada de espuma quanto na liofilização ($5,74 \pm 0,005$) apresentaram uma ligeira redução em relação ao valor do pH da folha do espinafre *in natura* que foi de $6,00 \pm 0,03$. Comportamento semelhante foi verificado por Zanatta, Schlabitz e Ethur. (2010), ao comparar as amostras de espinafre, cenoura e beterraba *in natura* à desidratada.

Paula *et al.* (2009) ao analisar o pH do espinafre minimamente processado encontrou valor de 6,4 superior ao valor encontrado neste estudo, tanto para o pó quanto para o *in natura*.

Zanatta, Schlabitz e Ethur. (2010) obtiveram para folha de espinafre *in natura* valor similar ($6,03 \pm 0,02$) ao encontrado no presente estudo, já para o pó foi encontrado valor inferior ($4,98 \pm 0,01$).

Quanto à acidez o maior valor foi encontrado no experimento 7 (1,51 g de ácido cítrico/100g) e o menor no experimento 8 (1,19 g de ácido cítrico /100g), não houve diferença

significativa entre os resultados obtidos ($p > 0,05$). Comparando o espinafre *in natura* e em pó percebe-se que ocorreu um aumento de cerca de 80% no teor de ácido cítrico em relação ao *in natura*. Este efeito provavelmente, ocorreu devido a secagem, pois a medida que o vegetal perde água os componentes químicos são concentrados. Mesmo comportamento verificado por Lima *et al.* (2024) na secagem da folha do noni por camada de espuma e por Riguetto *et al.* (2018) na secagem da polpa da uvaia por camada de espuma nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

O teor de sólidos solúveis totais, não apresentou diferença significativa entre os resultados ($p > 0,05$), variando entre 36 a 44° Brix, com menor teor observado no experimento 8.

Para o pó liofilizado foi encontrado um valor de 42 °Brix, próximo aos valores obtidos para os pós da secagem em camada de espuma. Também foi observado maior concentração de sólidos solúveis para os pós em relação a folha *in natura*, provavelmente devido a evaporação da água livre durante o processo de secagem.

Silva *et al.* (2023), na secagem da couve por camada de espuma, encontraram 1,2 °Brix para folha *in natura* e para os pós os valores variaram de 30 a 44 °Brix, corroborando com os resultados do presente estudo. Esse comportamento também foi observado por Oliveira *et al.* (2020a) ao desidratar a folha da graviola.

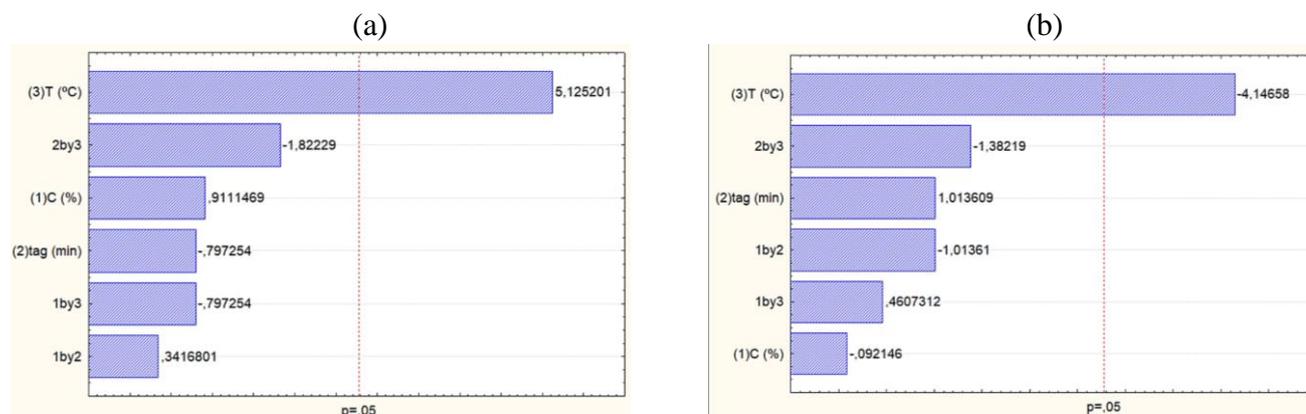
Com relação a atividade de água (a_w) constatou-se que houve diferença significativa entre as condições estudadas, entretanto todas as amostras desidratadas pela secagem em camada de espuma apresentaram valores abaixo de 0,6, resultado que desfavorece a proliferação de microrganismos e as reações bioquímicas que dependem da disponibilidade de água. Consequentemente, contribui para a conservação do produto, estendendo a possibilidade de consumo e evitando possíveis desperdícios com a utilização na forma *in natura*.

Os valores encontrados para atividade de água dos pós obtidos por camada de espuma foram próximos ao obtido por liofilização (0,465) e inferiores aos encontrados por Oliveira *et al.* (2020b) ao desidratar espinafre por convecção, que apresentaram variação 0,728 a 0,779.

Comparando os resultados de a_w das amostras *in natura* e desidratadas, verifica-se uma redução de até 70% em relação as amostras desidratadas por camada de espuma e 52% para as obtidas por liofilização.

A temperatura apresentou efeito linear significativo sobre a atividade de água ($p < 0,05$), podendo ser visualizado no gráfico de Pareto (Figura1).

Figura 1- Diagrama de Pareto do pó da folha de espinafre para o (a) pH e (b) aw.



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 3 são apresentados os resultados encontrados para o teor de fenólicos dos pós da folha de espinafre (*Tetragonia tetragonoides*) obtidos por camada de espuma e por liofilização.

Tabela 3. Valores médios de fenólicos totais para as amostras do pó da folha de espinafre.

Experimentos / condições	Média (mg EAG / 100 g pó)
E1 (2%, 6 min, 50 °C)	2056,876 ^a ± 11,66
E2 (4%, 6min, 50 °C)	1676,535 ^g ± 29,07
E3 (2%, 8 min, 50 °C)	1857,576 ^c ± 23,31
E4 (4%, 8 min, 50 °C)	1748,019 ^f ± 46,62
E5 (2%, 6 min, 70 °C)	1840,093 ^d ± 34,97
E6 (4%, 6 min, 70 °C)	1570,085 ^h ± 39,62
E7 (2%, 8 min, 70 °C)	1765,890 ^e ± 29,07
E8 (4%, 8 min, 70 °C)	1457,809 ^j ± 34,97
E9 (3%, 7 min, 60 °C)	1514,918 ⁱ ± 23,31
E10 (3%, 7 min, 60 °C)	1771,329 ^e ± 23,31
E11 (3%, 7 min, 60 °C)	1969,464 ^b ± 38,07
Liofilizado	2433,333 ± 23,31

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaboração própria

De acordo com a Tabela 3, pode-se inferir que para todas as amostras analisadas foi encontrado considerável teor de compostos fenólicos utilizando um extrato metanólico, com uma concentração mínima de 1457,809 mg EAG 100 g⁻¹ para o experimento 8 e máxima de

2056,876 mg EAG 100 g⁻¹ para o experimento 1. Pelo Teste de Tukey, observa-se que o teor de fenólicos totais dos pós obtidos por camada de espuma diferiram estatisticamente entre si.

O pó liofilizado, apresentou teor mais elevado de fenólicos totais (2433,333 mg EAG 100 g⁻¹ de pó) do que os obtidos por camada de espuma.

Observa-se também que para os pós obtido por camada de espuma, o processo de aquecimento pode ter proporcionado degradação parcial dos compostos fenólicos, resultando na diminuição da concentração de fenólicos ao elevar a temperatura de 50 para 70 °C, comportamento similar observado por Santos e Tonin, (2019) na secagem das folhas de *Plantago major*. Oliveira *et al.* (2020a) também verificaram que o teor de fenólicos totais do pó da folha de graviola obtido por secagem camada de espuma foi reduzido devido ao aumento da temperatura de secagem.

Rickman *et al.* (2007) relatam que a variação encontrada nos resultados dos compostos fenólicos pode ser devido às condições de processamento e armazenamento, considerando que esses compostos são hidrossolúveis e dependem da disponibilidade de oxigênio e exposição à luz. Portanto, a variação encontrada entre os experimentos (E9 a E11), pode estar relacionado ao tempo de armazenamento do pó.

Não foram encontrados estudos de fenólicos totais para espinafre em pó obtido por secagem em camada de espuma, porém Azevedo (2012) encontrou para espinafre em pó teor de 3744 mg de AGE 100 g⁻¹ superior ao encontrado no presente estudo, enquanto Vargas *et al.* (2022) encontraram teor inferior, 1090 mg de AGE 100 g⁻¹, ambos utilizando secagem convectiva, porém solução extratora, etanólica 50% (v/v) e metanólica 50% (v/v) respectivamente e metodologias distintas.

De acordo com Mazzeo *et al.* (2011), existem vários fatores que podem interferir no conteúdo de metabólitos secundários dos vegetais, dos quais os compostos fenólicos fazem parte. Dentre estes estão a sazonalidade, disponibilidade hídrica, condições agrônômicas, variedade do vegetal, método de extração e solução extratora.

Não houve interferência das variáveis independentes no teor de fenólicos das amostras analisadas para um nível de confiança de 95%, porém foi observado redução no teor de fenólicos ao elevar a concentração do emulsificante.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios do teor de umidade, cinzas, proteínas, lipídios e carboidratos do pó da folha de espinafre, para cada um dos experimentos realizados.

Tabela 4 - Caracterização do espinafre *in natura* e em pó para o teor de umidade, cinzas, proteínas, lipídios e carboidratos.

Experimentos / condições	Umidade (%)	Cinzas (%)	Proteínas (%)	Lipídios (%)	Carboidratos (%)
E1 (2%, 6 min, 50 °C)	6,88 ^a ± 0,02	17,00 ^a ± 0,48	18,52 ^{ef} ± 0,02	19,18 ^c ± 0,35	38,62 ^a ± 0,47
E2 (4%, 6 min, 50 °C)	6,77 ^{ab} ± 0,03	13,16 ^{cd} ± 0,41	13,53 ^h ± 0,01	30,95 ^a ± 0,12	35,67 ^{abc} ± 0,45
E3 (2%, 8 min, 50 °C)	6,34 ^c ± 0,02	16,33 ^a ± 0,84	20,00 ^d ± 0,08	18,78 ^c ± 0,20	38,55 ^a ± 1,04
E4 (4%, 8 min, 50 °C)	6,62 ^b ± 0,01	13,77 ^{cd} ± 0,14	17,80 ^f ± 0,03	27,57 ^b ± 1,21	34,25 ^{bcd} ± 0,88
E5 (2%, 6 min, 70 °C)	3,34 ^f ± 0,08	16,94 ^a ± 0,56	22,14 ^b ± 0,10	20,57 ^c ± 0,53	36,92 ^{ab} ± 0,34
E6 (4%, 6 min, 70 °C)	3,69 ^e ± 0,08	12,77 ^d ± 0,32	18,86 ^e ± 0,03	31,35 ^a ± 0,59	32,99 ^{cd} ± 0,23
E7 (2%, 8 min, 70 °C)	3,02 ^g ± 0,04	16,11 ^{ab} ± 0,19	22,36 ^b ± 0,84	21,04 ^c ± 0,96	37,49 ^a ± 1,48
E8 (4%, 8 min, 70 °C)	2,89 ^g ± 0,08	13,25 ^{cd} ± 0,17	14,79 ^g ± 0,01	30,36 ^a ± 0,01	38,18 ^a ± 0,73
E9 (3%, 7 min, 60 °C)	3,62 ^e ± 0,12	14,06 ^{cd} ± 0,38	21,24 ^c ± 0,06	27,36 ^b ± 1,30	33,63 ^{cd} ± 1,38
E10 (3%, 7 min, 60 °C)	3,75 ^{de} ± 0,06	14,24 ^{cd} ± 0,57	23,57 ^a ± 0,11	27,19 ^b ± 0,50	31,18 ^d ± 0,95
E11 (3%, 7 min, 60 °C)	3,92 ^d ± 0,09	14,67 ^{bc} ± 0,42	22,10 ^b ± 0,02	27,15 ^b ± 0,50	32,18 ^d ± 0,62
Liofilizado	6,26 ± 0,07	17,82 ± 0,15	25,54 ± 0,06	6,99 ± 0,40	43,39 ± 0,37
<i>In natura</i>	94,00 ± 0,02	1,80 ± 0,06	1,50 ± 0,01	0,20 ± 0,01	2,50 ± 0,00

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: Elaboração própria

Dos resultados obtidos para umidade, mostrados na Tabela 4, verifica-se que os mesmos apresentaram diferença significativa entre as condições, sendo os maiores teores de umidade encontrados nos experimentos 1 e 2 (6,88 e 6,77% respectivamente), na menor temperatura de secagem (50 °C), enquanto os menores foram verificados para os experimentos 7 e 8 (2,89 e 3,02% respectivamente), para temperatura de 70 °C.

O pó obtido por liofilização apresentou o teor de umidade inferior aos valores encontrados para os pós obtidos por secagem em camada de espuma na temperatura de 50 °C e superior aos valores encontrados na temperatura de 60 e 70 °C.

Todos os valores obtidos para umidade do espinafre em pó estão de acordo com a legislação, que estabelece o limite de 15%. Indicando boa estabilidade microbiológica (BRASIL, 2005b).

Também foi observado uma redução expressiva tanto da umidade do espinafre *in natura* após o processo de secagem, quanto no desidratado ao elevar a temperatura, comportamento similar constatado por Rodrigues, Geraldi e Loss (2020) na secagem da polpa da guavira por camada de espuma.

Azevedo (2012), no estudo espinafre em pó obtido por secagem convectiva obteve valor superior para umidade, $7,49 \pm 0,28\%$. Já Lisiewska *et al.* (2009) obtiveram valor de 6,19 % de umidade, o qual encontra-se dentro da faixa obtida no presente estudo.

O teor de cinzas variou de 12,77 a 17,00%, o que demonstra ser uma boa fonte de minerais, com potencial para enriquecimento em novas formulações. Para o pó obtido por liofilização o teor de cinzas foi de 17,82%, valor próximo aos encontrados nos experimentos que utilizaram as menores concentrações de emulsificante (E1, E3, E5 e E7), indicando que quanto menor a concentração do emulsificante, maior será o teor de cinzas.

Constatou-se que a concentração do emulsificante influenciou o teor de cinzas ($p < 0,05$).

Sebastião (2021) obteve valor inferior para o teor de cinzas (13,20%) enquanto Ferreira, Alberto e Munhoz (2020) e Azevedo (2012) obtiveram valores de 20,97% e 19,01% respectivamente, dentro da variação encontrada neste estudo.

Com relação a proteína os valores obtidos apresentaram variação de 13,53 a 23,57% entre as condições estudadas, porém as variáveis independentes não influenciaram estatisticamente nos resultados ($p < 0,05$). No entanto, observa-se uma tendência ao aumento do teor de proteína à medida que ocorre redução da concentração do emulsificante.

De acordo com os resultados da Tabela 4, o pó liofilizado apresentou um teor de proteína superior aos obtidos por meio da secagem em camada de espuma.

Jaworska e Kmiecik (2000) encontraram no pó de espinafre de mesma espécie, teores de 27,50 a 30,60%, superiores aos valores encontrados neste estudo. Resultados semelhantes aos obtidos por Sebastião (2021) e Azevedo (2012), 28,51 e 29,17% respectivamente. Essas diferenças se devem, provavelmente, ao método de secagem, às condições climáticas, local de plantio, tipo de solo e métodos de análises.

Quanto ao conteúdo lipídico, o maior valor foi encontrado no experimento 6 (31,35%) e menor no experimento 3 (18,78%), verifica-se que a concentração do emulsificante exerceu efeito significativo nas respostas obtidas ($p < 0,05$), ou seja, quanto maior a concentração do emulsificante maior é o conteúdo lipídico.

Para o liofilizado, o teor de lipídios encontrado foi inferior aos obtidos pela secagem em camada de espuma no presente estudo, acredita-se que essa diferença no teor de lipídios do pó da folha de espinafre, seja devido a adição do emulsificante utilizado para formar a espuma, uma vez que sua composição majoritária é constituída por monoglicérides de ácidos graxos destilados.

O teor de lipídios para o pó da folha de espinafre obtido por camada de espuma é aproximadamente 8 vezes maior do que o valor encontrado para o pó de espinafre por Sebastião

(2021) e Ferreira, Alberto e Munhoz (2020), 3,99 e 3,49% respectivamente, demonstrando que a adição do emulsificante favoreceu o aumento deste parâmetro. O mesmo comportamento foi verificado por Nunes *et al.* (2019), ao analisar o efeito da desidratação por camada de espuma em talos e folhas de cenoura.

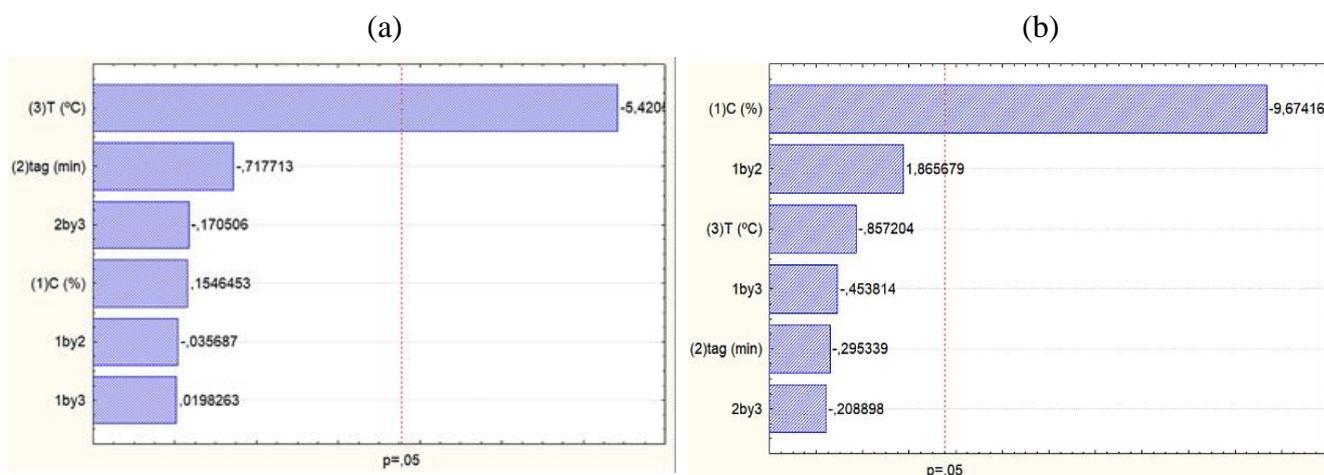
Os resultados para os carboidratos foram calculados por diferença, sendo o maior valor encontrado no experimento 1 (38,62%) e o menor no experimento 10 (31,18%), porém não foi verificado influência estatisticamente significativa sobre este parâmetro ($p > 0,05$).

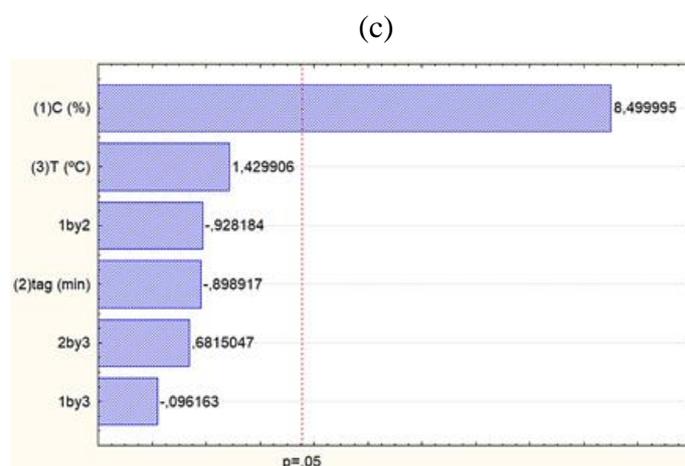
Os teores de carboidratos encontrados neste estudo foram superiores ao relatado por Azevedo (2012) e inferiores ao reportado por Sebastião (2021), no estudo do espinafre em pó obtido por secagem convectiva.

Matos *et al.* (2009), obteve teor de carboidratos de 35,78% para espinafre em pó, similar aos valores encontrados no presente estudo. Já Galla *et al.* (2017) verificaram ao analisar o espinafre em pó da espécie *Spinacea oleracea* valor inferior (30,28%).

Pela análise estatística foi observado que a concentração do emulsificante influenciou nas respostas de cinzas e lipídios, assim como a temperatura de secagem influenciou significativamente nas respostas de umidade, sendo seus efeitos melhor visualizado por meio do diagrama de Pareto apresentado na Figura 2. Os demais parâmetros (proteínas e carboidratos) não foram influenciados estatisticamente pelas variáveis independentes, no intervalo de confiança de 95%.

Figura 2 - Diagrama de Pareto para os efeitos das variáveis (concentração do emulsificante, tempo de agitação e temperatura de secagem) sobre as respostas: (a) umidade, (b) cinzas e (c) lipídios no pó da folha do espinafre.





Elaboração própria

O colorímetro Minolta é um espectrofotômetro de reflectância que determina parâmetros de aparência de cor com base no espectro de reflectância. Este dispositivo apresenta a aparência da cor na escala L^* , a^* e b^* . O valor L^* reflete a função de luminosidade, indicando o quanto claro ou escura é a amostra em uma escala de 0 a 100, valores altos indicam cores claras e baixos cores escuras. Os valores a^* e b^* representam a intensidade dos componentes de cor vermelha ($+a^*$) ou verde ($-a^*$) e amarela ($+b^*$) ou azul ($-b^*$), respectivamente. Sendo assim, a Tabela 5 apresenta os resultados da determinação de cor do espinafre em pó.

Tabela 5 - Valores médios de cor instrumental do pó da folha de espinafre.

Experimentos / condições	L^*	a^*	b^*	C	$^{\circ}h$
E1 (2%, 6 min, 50° C)	54,89 ^{cde} ± 0,53	-8,74 ^d ± 0,13	18,86 ^{ef} ± 0,33	20,87 ^{de} ± 0,34	114,77 ^d ± 0,15
E2 (4%, 6 min, 50° C)	56,38 ^c ± 0,12	-9,81 ^{bc} ± 0,14	20,26 ^{bcd} ± 0,29	22,50 ^b ± 0,32	115,83 ^{bc} ± 0,05
E3 (2%, 8 min, 50° C)	58,08 ^b ± 0,17	-9,51 ^c ± 0,15	19,79 ^{cde} ± 0,31	22,01 ^{bc} ± 0,35	115,60 ^c ± 0,11
E4 (4%, 8 min, 50° C)	62,18 ^a ± 0,39	-11,39 ^a ± 0,13	22,02 ^a ± 0,29	24,79 ^a ± 0,31	117,36 ^a ± 0,06
E5 (2%, 6 min, 70° C)	56,22 ^{cd} ± 0,47	-9,96 ^{bc} ± 0,09	20,66 ^{bc} ± 0,24	23,07 ^b ± 0,24	115,58 ^c ± 0,24
E6 (4%, 6 min, 70° C)	54,83 ^{cde} ± 0,59	-8,67 ^d ± 0,13	19,38 ^{def} ± 0,27	21,23 ^{cd} ± 0,29	115,99 ^{bc} ± 0,20
E7 (2%, 8 min, 70° C)	53,31 ^{ef} ± 0,36	-10,12 ^b ± 0,10	20,43 ^{bcd} ± 0,26	22,79 ^b ± 0,26	116,34 ^b ± 0,24
E8 (4%, 8min, 70° C)	52,16 ^f ± 0,29	-8,66 ^d ± 0,16	17,53 ^{gh} ± 0,40	19,56 ^f ± 0,43	116,30 ^b ± 0,13
E9 (3%, 7 min, 60° C)	58,09 ^b ± 0,41	-8,72 ^d ± 0,14	21,23 ^{ab} ± 0,13	22,95 ^b ± 0,07	112,33 ^{ef} ± 0,44
E10 (3%, 7 min, 60° C)	54,61 ^{de} ± 0,71	-7,20 ^e ± 0,09	17,06 ^h ± 0,27	18,25 ^g ± 0,11	112,87 ^e ± 0,10
E11 (3%, 7 min, 60° C)	54,83 ^{cde} ± 0,70	-7,53 ^e ± 0,22	18,43 ^h ± 0,46	19,94 ^{ef} ± 0,48	112,22 ^f ± 0,11
Liofilizado	56,65 ± 0,18	-9,84 ± 0,35	15,05 ^{fg} ± 0,63	17,98 ± 0,72	123,18 ± 0,22
<i>In natura</i>	37,49 ± 1,69	-14,42 ± 0,16	19,37 ± 0,33	24,15 ± 0,19	126,66 ± 0,76

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Valores expressos como média e desvio-padrão.

Fonte: Elaboração própria

A cor é o primeiro critério utilizado na aceitação ou rejeição do produto pelo consumidor, por isso, na indústria de alimentos a cor é um atributo importante (Pathare, Opara e Al-said, 2013).

A coloração verde apresentada para o pó da folha de espinafre tanto pelo método de camada de espuma quanto pela liofilização é decorrente da cor da folha da hortaliça e está relacionada com a presença de clorofila, composto fitoquímico caracterizado pela pigmentação verde (Ramos *et al.*, 2018).

Os resultados encontrados para os parâmetros de cor dos pós da folha de espinafre diferiram entre si ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

A luminosidade (L^*) é um parâmetro que está relacionado com a intensidade da cor e é descrita como clara ou escura, valores altos indicam cores claras e baixos cores escuras, em uma escala de 0 a 100.

Os valores de L^* variaram de 52,16 a 62,18, sendo a menor luminosidade observada no experimento 8 e a maior verificada no experimento 4, ou seja, valores maiores de L^* tendem à cor mais clara. Qualitativamente percebe-se que o espinafre em pó obtido por camada de espuma sofreu uma variação na sua coloração ao elevar a temperatura, fato melhor visualizado por meio da Figura 3, onde é mostrado o pó resultante para temperatura de 50 e 70 °C.

Figura 3 - Cor do espinafre em pó obtido por camada de espuma nas temperaturas: (a) 50 °C e (b) 70 °C.



Fonte: Elaboração própria

Vargas *et al.* (2022) ao determinar a cor do espinafre (*Tetragonia tetragonoídes*) desidratado por secagem de ar quente convectiva a 70 °C, observaram perda da cor verde corroborando com o resultado encontrado neste estudo.

Com relação ao parâmetro a^* , houve maior tendência a cor verde (valores -), sendo a menor intensidade constatada no experimento 4, para temperatura de 50 °C. Para o parâmetro b^* houve uma tendência ao amarelo (valores +) para todos experimentos, apresentando o maior valor no experimento 4 e o menor no experimento 10. Quanto a cromaticidade, ficaram entre 18,25 e 24,79 prevalecendo o aspecto opaco, sendo maior no experimento 4 e menor no experimento 10. Para o $^{\circ}h$, que define o ângulo da tonalidade, foram verificados valores de 112,22 a 117,36 confirmando que a cor está situada entre o amarelo ($+b^*$) e o verde ($-a^*$).

Ferreira *et al.* (2020), encontraram valores semelhantes para os parâmetros de cor L^* , b^* , C e $^{\circ}h$ do espinafre em pó obtido pela secagem solar ($55,83 \pm 0,66$, $17,99 \pm 0,19$, $18,24 \pm 0,17$ e $99,58 \pm 0,36$ respectivamente), exceto o a^* que apresentou maior valor ($-3,03 \pm 0,09$). Valores próximos também foram obtidos por Galla *et al.* (2017), na análise da cor instrumental para o espinafre em pó da espécie *Spinacea oleracea* ($L^* 55,36$, $a^* -3,35$ e $b^* 13,91$).

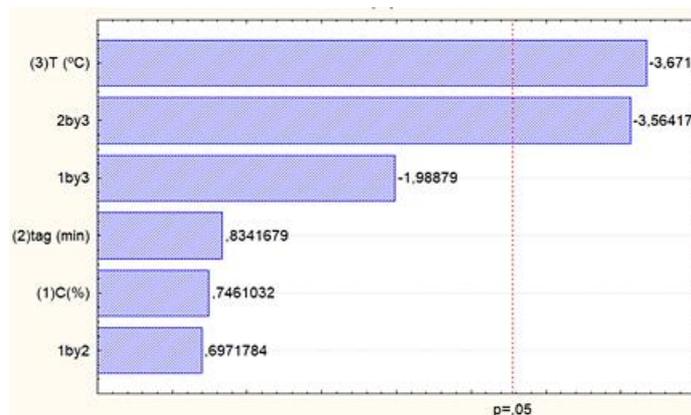
Vargas *et al.* (2022) encontraram valores inferiores ao analisar a cor do espinafre em pó obtido por convecção a partir de espinafre congelado ($L^* 24,51$, $a^* -4,2$, $b^* 10,18$ e $C^* 10,63$).

Comparando os resultados para os pós de espinafre obtidos por secagem em camada de espuma e por liofilização observou-se similaridade entre valores encontrados.

Pela análise estatística, constatou-se que a variável temperatura e a interação tag x T exerceram efeito estatisticamente significativo sobre as respostas de luminosidade (L^*) da cor. Os demais parâmetros a^* , b^* , C^* e $^{\circ}h$ não tiveram influência estatisticamente significativa (Apêndice A).

O efeito da temperatura e sua interação tempo de agitação x temperatura sobre a resposta L^* foi negativo, indicando que quanto menores forem os seus valores, maior será o valor da luminosidade. Com o diagrama de Pareto (Figura 4) é possível uma melhor compreensão visual desse comportamento.

Figura 4 - Diagrama de Pareto para cor (L*) pó da folha espinafre.



Fonte: Elaboração própria

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

Quanto às características físico-químicas, os pós obtidos demonstraram pH levemente ácido, elevação do teor de acidez após a secagem e alto teor de sólidos solúveis variando de 36 a 44 °Brix. A atividade de água dos pós está abaixo do limite mínimo capaz de permitir o desenvolvimento de microrganismos ($< 0,6$) e a umidade de acordo com o preconizado pela legislação ($\leq 15\%$), demonstrando boa estabilidade microbiológica, favorecendo assim a conservação e o armazenamento.

Os pós apresentaram elevado teor de compostos fenólicos, tornando-o assim uma opção interessante para indústria de alimentos e farmacêutica, podendo ser utilizado como produto ou matéria-prima em novas formulações.

Com relação a composição centesimal (cinzas, carboidratos, proteínas e lipídeos), os resultados obtidos para os pós revelaram que houve preservação dos nutrientes após desidratação, no entanto houve um aumento considerável no teor de lipídios, devido à adição do emulsificante (portogel).

Os pós apresentaram coloração verde, variando para tons mais escuros ao elevar a temperatura de secagem de 50 para 70 °C, demonstrando a influência da temperatura sobre a luminosidade do pó.

Por fim, a secagem em camada de espuma é viável para obtenção do pó da folha de espinafre visto que, ao final do processo foi obtido um produto com baixa umidade e atividade de água, podendo ser armazenado por período prolongado, mostrando ser uma alternativa

promissora no pós-colheita dessa hortaliça, uma vez, que reduz o desperdício, promove a retenção dos componentes nutricionais e possibilita o uso do produto funcional e nutritivo em forma de pó.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, F. L. A. A. **Valor nutricional, capacidade antioxidante e utilização de folhas de espinafre (*Tetragonia tetragonoides*) em pó como ingrediente de pão de forma**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

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. Diário Oficial da União, 2005b. Disponível em <<http://www.saude.rj.gov.br/comum/code/MostrarArquivo.php?C=MjA0NA%2C%2C>>. Acesso em: 15/06/24.

BRASIL. Resolução de Diretoria Colegiada – **RDC nº 263**, de 22 de setembro de 2005. Dispõe sobre regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. Diário Oficial da União, 2005b. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_263_2005_.pdf/2b494d48-0d39-4c8d-84d1-e20ec6e9190f>. Acesso em: 10/06/24.

BROUWER-BROLSMA, E.M.; BRANDL, B.; BUSO, M.E.C.; SKURK, T.; MANACH, C. Food intake biomarkers for green leafy vegetables, bulb vegetables, and stem vegetables: a review. **Genes & Nutrition**, v. 15, n.7, p. 1-12, 2020.

CABRAL FILHA, M. C. S.; CANUTO, M. F. C. S.; SOUSA, J. H. S.; SILVA, D. R. S.; FARIAS, F. P. M. Secagem em camada de espuma da polpa da goiaba (*Psidium guajava* L.). Revista Semiárido De Visu, v. 12, n. 1, p. 178-193, 2023.

CARDOSO, C. E. D. F.; LOBO, F. A. T. F.; TEODORO, A. J. Influence of foam mat drying on the nutritional and technological potential of fruits—a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n.1, p. 1-15, 2022.

DI FAN, H. D. M.; ZHANG, J.; KIRBY, C. W.; XIUHONG, J.; LOCKE, S. J.; CRITCHLEY, A. T.; PRITHIVIRAJ, B. Commercial extract of the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* enhances phenolics antioxidant content of spinach (*Spinacea oleracea* L) which protects Caenorhabditis elegans oxidative and thermal stress. **Food Chemistry**, v. 124, p. 195-202, 2011.

FERREIRA, T. H. B.; ALBERTO, M. A. A.; MUNHOZ, C. L. Qualidade de biscoitos tipo *cookie* adicionados de farinha de espinafre (*Tetragonia tetragonoides*). **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 8, n. 4, 2020.

GALLA, N. R.; PAMIDIGHANTAM, P. R.; BALASWAMY, K.; GRUSIDDAIAH, M. R.; AKYLA, S. Nutritional, textural and sensory quality of biscuits supplemented with spinach (*Spinacia oleracea L.*). **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 7, n. 74, 2016, p. 20–26, 2017.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos: normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**, v. 1. 4 ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

JAWORSKA, G.; KMIĘCIK, W. Comparison of the nutritive value of frozen spinach and New Zealand spinach. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, Olsztyn, v. 4, n. 9, p. 79-84, 2000.

JÚNIOR, J.C.S.; JÚNIOR, M.P. O.; FURQUIM, M.G.D.; SOUZA, C.B.; OLIVEIRA, D.C.; FREITAS, R.B.R. Aspectos socioeconômicos na produção e comercialização de hortaliças folhosas no Município de Iporá – GO. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 17, n. 3, p. 01-17, 2024.

LEITE, A. C. N.; CAVALCANTE, J. A.; COSTA, N. A.; Pinheiro, W. S. Cinética de secagem em camada de espuma da *Mentha crispa* e ajuste de modelos matemáticos. **Revista Engenharia na Agricultura- Reveng**, v. 31, p. 1-18, 2023.

LIMA, A. C. F.; OLIVEIRA, B. F.; SILVA, W. K. V.; BONFIM, K. S.; NÓBREGA, M. M. G.; SILVA, Y. T. F.; CAVALCANTE, J. A.; CORNÉLIO, M. L. Secagem em camada de espuma da folha do noni (*Morinda citrifolia L.*). **Revista Observatorio de La Economia Latinoamericana**, v. 22, n. 1. p. 345 – 370, 2024.

LISIEWSKA, Z.; GEGCZYNSKI, P.; BERNÁS, E.; KMIĘCIK, W. Retention of mineral constituents in frozen leafy vegetables prepared for consumption. **Journal Food Composition and Analysis**, New Jersey, v. 22, n. 3, p. 218-223, 2009.

MATOS, J. D. P.; FIGUEREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; SOARES, M. S.; SILVA, S. N.; SILVA, L. P. F. R. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa mista de jambolão e acerola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 7, p. 502-512, 2022.

MAZZEO, T.; N'DRI, D.; CHIAVARO, E.; VISCONTI, A.; FOGLIANO, V.; PELLEGRINI, N. Effect of two cooking procedures on phytochemical compounds, total antioxidante capacity and colour of selected frozen vegetables. **Food Chemistry**, New Jersey, v. 128, n. 3, p. 627-633, 2011.

NUNES, G.; LIMA-CORRÊA, R. A. B.; NASCIMENTO, B. S.; Efeito da desidratação em camada de espuma na composição centesimal de talos e folhas de cenoura, p. 1960-1966. In: **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. São Paulo: Blucher, 2019.

OLIVEIRA, B. F.; Negreiros, J. K. S.; BONFIM, K. S.; CAVALCANTE, J. A.; PINTO, M. F.; COSTA, N. A. Modelagem matemática da cinética em camada de espuma da folha da

gravioleira (*Annona muricata* Linn) e caracterização do pó obtido. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, 2020a.

OLIVEIRA, W. E. S.; LIRA, E. S.; ALVES, A. J. L.; CAVALCANTE, J. A.; ROMÃO, T. D.; MOREIRA, M. F.; NETO, E. N. R. Estudo da distribuição de ar em secador e influência na qualidade do produto seco. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 49857–49864, 2020b.

ONOIKO, O. B.; ZOLOTAREVA, O. K. Compostos bioativos e potencial farmacocognóstico de *Tetragonia tetragonooides*. **Biotecnologia Acta**, v. 17, n. 1, 2024.

PANDJAITAN, N.; HOWARD, L. R.; MORELOCK, T, GIL, M I. Antioxidant capacity and phenolic content of spinach as affected by genetics and maturation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 53, p. 8618–8623, 2005.

PAULA, N. R. F.; BOAS, E.V. B. V.; RODRIGUES, L. J.; CARVALHO, R. A.; PICCOLI, R. H. Qualidade de produtos minimamente processados e comercializados em gôndolas de supermercados nas cidades de Lavras-MG, Brasília-DF e São Paulo-SP. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, p. 219-227, 2009.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, p. 36–60, 2013.

PIENIZ, S.; COLPO, E.; OLIVEIRA, V. R.; ESTEFANEL, V.; ANDREAZZA, R. Avaliação *in vitro* do potencial antioxidante de frutas e hortaliças. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras.v. 33, n. 2 p. 552-559, 2009.

PINTO, U. M.; LANDGRAF, M.; FRANCO, B. D. G. M. **Deterioração microbiana dos alimentos. Microbiologia e higiene de alimentos – Teoria e prática**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Rubio, v. 1, p. 33-52, 2019.

RAMOS, F.S.A.R.; SANTOS, T.C.; GOMES, M.C.S.; Munhoz, C.L. Aceitabilidade de biscoito tipo cookie enriquecido com farinha de jatobá. **Cadernos de Agroecologia**, v. 13, n. 2, 2018.

RICKMAN, J. C.; BARRETT, D. M.; BRUHN, C. M. Nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. Part 1. Vitamins C and B and phenolic compounds. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 87, p. 930–944, 2007.

RODRIGUES, J. D.; GERALDI, C. A. Q.; LOSS, R. A. Secagem em camada de espuma e caracterização físico química da polpa de guavira (*Campomanesia adamantium*), In: Congresso Internacional da Agroindústria, Recife, 2020. Disponível em: <<https://ciagro.institutoidv.org/ciagro/uploads/1972.pdf>>. Acesso em: 03 mai.2024.

RIGUETO, C. V. T.; EVARISTO, L. M.; GERALDI, C. A. Q.; COVRE, L. Influência da temperatura de secagem de uvaia (*Eugenia pyriformis*) em camada de espuma. **Revista ENGEVISTA**, v. 20, n. 4, p. 537-547, 2018.

ROCHA, M.V.G.; OLIVEIRA, A.B.S.; PROFIRIO, L.S.; CRUZ, A.R.; SOUZA, F.C. Avaliação físico-química da polpa de manga (*Tommy atkins*) em pó obtida por meio da secagem em camada de espuma. **Revista Semiárido De Visu**, v. 11, n. 1, p. 1-19, 2023.

SANTOS, K.B.; TONIN, L.T.D. Estudo da influência da temperatura de secagem e solvente extrator na capacidade antioxidante de folhas *Plantago major*. **Revista Fitos**, v. 13, n. 3, p. 200 - 211, 2019.

SEBASTIÃO, V. G. **Cereal matinal colorido naturalmente utilizando farinha de vegetais**. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, São Paulo, 2021.

SILVA, Q. A.; NÓBREGA, M. M. G., MORAIS, M. A. P.; OLIVEIRA, B. F.; LOPES, J. D.; SILVA, Y. T. F.; CAVALCANTE, J. A. Cinética de secagem, propriedades físico-químicas e compostos bioativos da couve folha (*Brassica oleracea* L.) seca em camada de espuma. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 9, p. 11222-11247, 2023.

SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. **Methods in Enzymology**, v. 299, p. 152-178, 1999.

SOUZA, J. B. P. **Secagem em camada de espuma das folhas de alecrim (*Rosmarinus officinalis* L.)**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

VARGAS, L.; KAPOOR, R.; NEMZER, B.; FENG, H. Application of diferente drying methods for evaluation of phytochemical content and physical properties of brocoli, kale and spinach. **Journal LWT – Food Science and Tecnology**, v. 155, 2022.

ZANATTA, C. L.; SCHLABITZ C; ETHUR, E. M. Avaliação físico-química e microbiológica de farinhas obtidas a partir de vegetais não conformes à comercialização. **Alimentos e Nutrição**, v. 21, n. 3, p. 459-468, 2010.

6 CONCLUSÕES

Mediante os resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- As espumas apresentaram boa espumabilidade e estabilidade, utilizando o portogel como emulsificante para produzi-las na concentração (2, 3 e 4%) e tempo de agitação (6, 7 e 8 min).
- A temperatura foi a variável que apresentou influência estatisticamente significativa no intervalo de confiança de 95% sobre o tempo final de secagem. Quanto ao teor de umidade, as variáveis independentes não exerceram influência estatisticamente significativa sobre o seu resultado.
- O aumento da temperatura promoveu uma redução significativa no tempo de secagem da espuma do espinafre. O modelo Page modificado foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais e, portanto, o mais indicado para representar o fenômeno de secagem em camada de espuma do espinafre nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, pois apresentou os maiores valores do coeficiente de determinação e menores valores de erro padrão da estimativa.
- Considerando as características do processo e do produto, a melhor condição de secagem, ocorre ao se trabalhar com temperatura de 70 °C, 2% de concentração de emulsificante e tempo de agitação de 6 min, obtendo-se um tempo de secagem de 120 min e teor de água de 8,1 (bs).
- Quanto às características físico-químicas, os pós obtidos demonstraram caráter pouco ácido ($\text{pH} > 4,5$), baixa acidez e alto teor de sólidos solúveis. A atividade de água dos pós está abaixo do limite mínimo capaz de permitir o desenvolvimento de microrganismos ($< 0,6$) e a umidade de acordo com o preconizado pela legislação ($\leq 15\%$), demonstrando boa estabilidade microbiológica, favorecendo assim a conservação e o armazenamento.
- Os pós apresentaram elevado teor de compostos fenólicos significativos, tornando-o assim uma opção interessante para indústria de alimentos e farmacêutica, podendo ser utilizado como produto ou matéria-prima em novas formulações.
- Com relação a composição centesimal (cinzas, carboidratos, proteínas e lipídeos), os resultados obtidos para os pós revelaram que houve concentração dos nutrientes comparado ao *in natura* e um aumento considerável no teor de lipídios, devido à adição do Portogel®.
- Os pós apresentaram coloração verde, variando para tons mais escuros ao elevar a temperatura de secagem de 50 para 70 °C, demonstrando a influência da temperatura sobre a luminosidade do pó.

Por fim, a secagem em camada de espuma é viável para obtenção do pó da folha de espinafre visto que, foi obtido um produto estável em menor tempo operacional que a liofilização, podendo ser armazenado por período prolongado, demonstrando ser uma alternativa promissora no pós-colheita dessa hortaliça, uma vez, que reduz o desperdício, promove a retenção dos componentes nutricionais e possibilita o uso do produto em novas formulações.

REFERÊNCIAS

- ALVES, T. P.; NICOLETI, J. L. F. Influência das variáveis de processo sobre a secagem osmo-convectiva de pimentão verde. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 10, n. 1, 2016.
- ANTUNES, E. R. Avaliação dos compostos bioativos polifenóis, carotenóides e glucosinolatos de hortaliças e sua importância nutricional para prevenção de doenças. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 2, n. 9, p. 191-207, 2024.
- ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. R.; OLIVEIRA, A. N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, p. 4-9, 2017.
- 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.
- BARBOSA, C. K. R.; FINGER, F. L.; CASALI, V. W. D. Handling and postharvest shelf life of ora-pro-nobis leaves. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 37, n. 3 p. 307-311, 2015.
- BEZERRA, T. S. **Desidratação de hortaliças: aspectos teóricos**. 53 f. Monografia (Especialização em Tecnologia de Alimentos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- BIANCO, M. S. **Viabilidade agroeconômica do consórcio de couve com espinafre Nova Zelândia**. 55f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias e Veterinárias) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.
- BISCARO, G. A.; MARQUES, R. J. R. M.; BATISTA, C. M.; MONACO, K. A.; ENSINAS, S. C.; REZENDE, R. K. S. Efeito de diferentes níveis de fertirrigação nas características morfofisiológicas de espinafre. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 487-493. 2011.
- BISCARO, G. A.; MISSIO, C.; MOTOIYA, A. V. A.; GOMES, E. P.; TAKARA, J. G.; SILVEIRA, B. L. R. Produtividade e análise econômica da cultura do espinafre em função de níveis de fertirrigação nitrogenada. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 587-596, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Relatório Final de Perdas e Desperdícios de Alimentos**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/perdas-e-desperdicio-de-alimentos/publicacoes-em-destaque/relatorio-final-perdas-e-desperdicio/view>>. Acesso em: 02 nov. 2023.
- 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. Diário Oficial da União, 2005a. Disponível em

<<http://www.saude.rj.gov.br/comum/code/MostrarArquivo.php?C=MjA0NA%2C%2C>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

BRASIL. Resolução de Diretoria Colegiada – **RDC n° 263**, de 22 de setembro de 2005. Dispõe sobre regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. Diário Oficial da União, 2005b. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_263_2005_pdf/2b494d48-0d39-4c8d-84d1-e20ec6e9190f>. Acesso em: 10 nov. 2023.

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.

CARVALHO, P. G. B.; MACHADO, C. M. M.; MORETTI, C. I.; FONSECA, M. E. N. Hortaliças como alimentos funcionais. **Horticultura Brasileira**, v. 24, n. 4, 2006.

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

COSTA, I. I. S. **Secagem da folha do manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) pelo método de camada de espuma**. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

DANTAS, S. C. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método *foam-mat***. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

DEFRAEYER, T. Impacto of size and shape of fresh-cut fruit on the drying time and fruit quality. **Journal of Food Engineering**, v. 210, p. 35-41, 2017.

DIAS, J. S. Nutritional Quality and Effect on Disease Prevention of Vegetables. **Food and Nutrition Sciences**. v. 10, n. 4, p. 369-402, 2019.

DI FAN, H. D. M.; ZHANG, J.; KIRBY, C. W.; XIUHONG, J.; LOCKE, S. J.; CRITCHLEY, A. T.; PRITHIVIRAJ, B. Commercial extract of the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* enhances phenolics antioxidant content of spinach (*Spinacea oleracea* L) which protects Caenorhabditis elegans oxidative and thermal stress. **Food Chemistry**, v. 124, p. 195-202, 2011.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying of spinach leaves in convective dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 32, p. 112-125, 2009.

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de alimentos**; 2ª ed. São Paulo: Atheneu, 2005. 652 p.

ERENTURK, S.; GULABOGLU, M.S.; GULTEKIN, S. The thinlayer drying characteristics of roseship. **Biosystems Engineering**, Oxford, v. 89, n. 2, p.159-166, 2004.

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**; 4ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2019. 602 p.

FRANCO, T. S. **Desidratação de suco de yacon pelo método de camada de espuma**. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

GASPARIN, P. P. **Secagem da *Mentha piperita* em leito fixo utilizando diferentes temperaturas e velocidades de ar**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

GOUVEIA, C. A. **Secagem do jambo (*Brassica oleracea* L.) em camada de espuma (foam-mat drying)**. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

IAL. Instituto Adolfo Lutz.; **Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo**, 4ª ed., 2008.

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.

LANA, M. M.; TAVARES, S.A. **Hortaliças como comprar, conservar e consumir**. 2ª ed. rev. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2010. 209p.

LEITE, A. C. N.; CAVALCANTE, J.A.; Costa, N. A.; Pinheiro, W. S. Cinética de secagem em camada de espuma da *Mentha crisper* e ajuste de modelos matemáticos. **Revista Engenharia na Agricultura- Reveng**, v. 30, p. 1-18, 2023.

MANGUEIRA, E. R. **Estudo da secagem em camada de espuma (foam-mat drying) do ovo de pata**. 112 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

MARQUES, G. M. R. **Secagem de caldo de cana em leito de espuma e avaliação sensorial do produto**. 84 f. 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, 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.

MAYTA, S. M.; MASSARANI, G.; PINTO, J. C. Modeling of grain drying in continuous cross-flow sliding bed dryers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 74, p. 797-805, 1996.

MELO, K. S.; FIGUEREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; FERNANDES, T. K. S.; BEZERRA, M. C. T. Secagem de espuma da polpa do fruto mandacaru: experimentação, ajustes de modelos matemáticos. **Revista Caatinga** v. 26, n. 2, p. 10-17. 2013.

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, 2021.

MOTA, R. V. Avaliação da qualidade físico-química e aceitabilidade de passas de pêsego submetidos à desidratação osmótica. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 789-794, 2005.

OLIVEIRA, E. N. A.; SANTOS, D. C. **Tecnologia e Processos de Frutos e Hortaliças**. Natal: IFRN Editora, 2015. 234p.

OLIVEIRA, B. F.; NEGREIROS, J.K.S.; BONFIM, K. S.; CAVALCANTE, J. A.; PINTO, M. F.; COSTA, N. A. Modelagem matemática da cinética em camada de espuma da folha da gravioleira (*Annona muricata* Linn) e caracterização do pó obtido. **Research Society and Development**, v. 9, n. 4, 2020.

ONOIKO, O. B.; ZOLOTAREVA, O. K. Compostos bioativos e potencial farmacocognóstico de *Tetragonia tetragonooides*. **Biotecnologia Acta**, v. 17, n. 1, 2024.

PAIVA, E. M. de O. **Estudo da caseína como agente espumante na secagem de tomate pelo método foam-mat**. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

PEREIRA, D. A. **Extração aquosa de própolis e secagem em leito de espuma para uso em alimentos**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2008.

PIENIZ, S.; COLPO, E.; OLIVEIRA, V. R.; ESTEFANEL, V.; ANDREAZZA, R. Avaliação in vitro do potencial antioxidante de frutas e hortaliças. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras. v. 33, n. 2 p. 552-559, 2009.

REIS, C. G. dos. **Cinética de secagem de manga ‘princesa’ pelo método camada de espuma (foam-mat drying): experimentação e modelagem matemática**. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia de Alimentos no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, Salgueiro. 2019.

ROBALO, M. T. B. **Influência da aplicação de composto orgânico municipal nas características do solo, na produção e na qualidade do espinafre**. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica) – Universidade de Évora, Évora, 2021.

ROCHA, S. R. S. **Procedimentos e avaliação química de parâmetros de interesse nutricional de espinafre comercializado na Bahia**. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais – Química). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

ROCHA, D. R. C.; PEREIRA JÚNIOR, G. A.; VIEIRA, G.; PANTOJA, L.; SANTOS, A. S.; PINTO, N. A. V. D. Macarrão adicionado de ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller) desidratado. **Alimentos e Nutrição**, v. 19, n. 4, p. 459-465, 2008.

RONCHETI, E. F. S. **Estudo do processo de secagem em leite de espuma de cenoura, tomate, beterraba e morango**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2014.

RODRIGUES, J. J.; LIMA, M. E. P.; ALVES, K. A.; PACHECO, T. H.; CUNHA, G. L. N.; JOVELINO, J. R.; GALDINO, P. O.; SILVA, A. S. Análise cinética de secagem solar em amostras de batata doce. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 43122-43130, 2021.

SANTOS FILHO, A. S.; VELOSO, N. C.; CARELI, R. T.; CANO-CHAUCA, M. N., COSTA, C. A.; OLIVEIRA, N. J. F.; CAMPOS, J. A. Qualidade físico-química e microbiológica de hortaliças desidratadas ao sol e em secador laboratorial. **HOLOS**, v. 5, n. 34, p. 91-100, 2018.

SANTOS, K. L.; PANIZZON, J.; CENCI, M. M.; GRABOWSKI, G.; JAHNO, V. D. Food losses and waste: reflections on the current brazilian scenario. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, 2020.

SILVA, R. N. G.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, J. M.; GALDINO, P. O. Armazenamento de umbu-cajá em pó. **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 1179-1184, 2005.

SILVA, Q. A.; NÓBREGA, M. M. G., MORAIS, M. A. P.; OLIVEIRA, B. F.; LOPES, J. D.; SILVA, Y. T. F.; CAVALCANTE, J. A. Cinética de secagem, propriedades físico-químicas e compostos bioativos da couve folha (*Brassica oleracea* L.) seca em camada de espuma. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 9, p. 11222-11247, 2023.

SILVA, A. S.; GURJÃO, K. C. O.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, R. L. A.; PEREIRA, W. E. Desidratação da polpa de tamarindo pelo método camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1899-1905, 2008.

SILVA, P. C. G. **Secagem da folha de guajiru (*Chrysobalanus icaco* L.) pelo método de camada de espuma (foam-mat drying)**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

SOUZA, J. B. P. **Secagem em camada de espuma das folhas de alecrim (*Rosmarinus officinalis* L.)**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

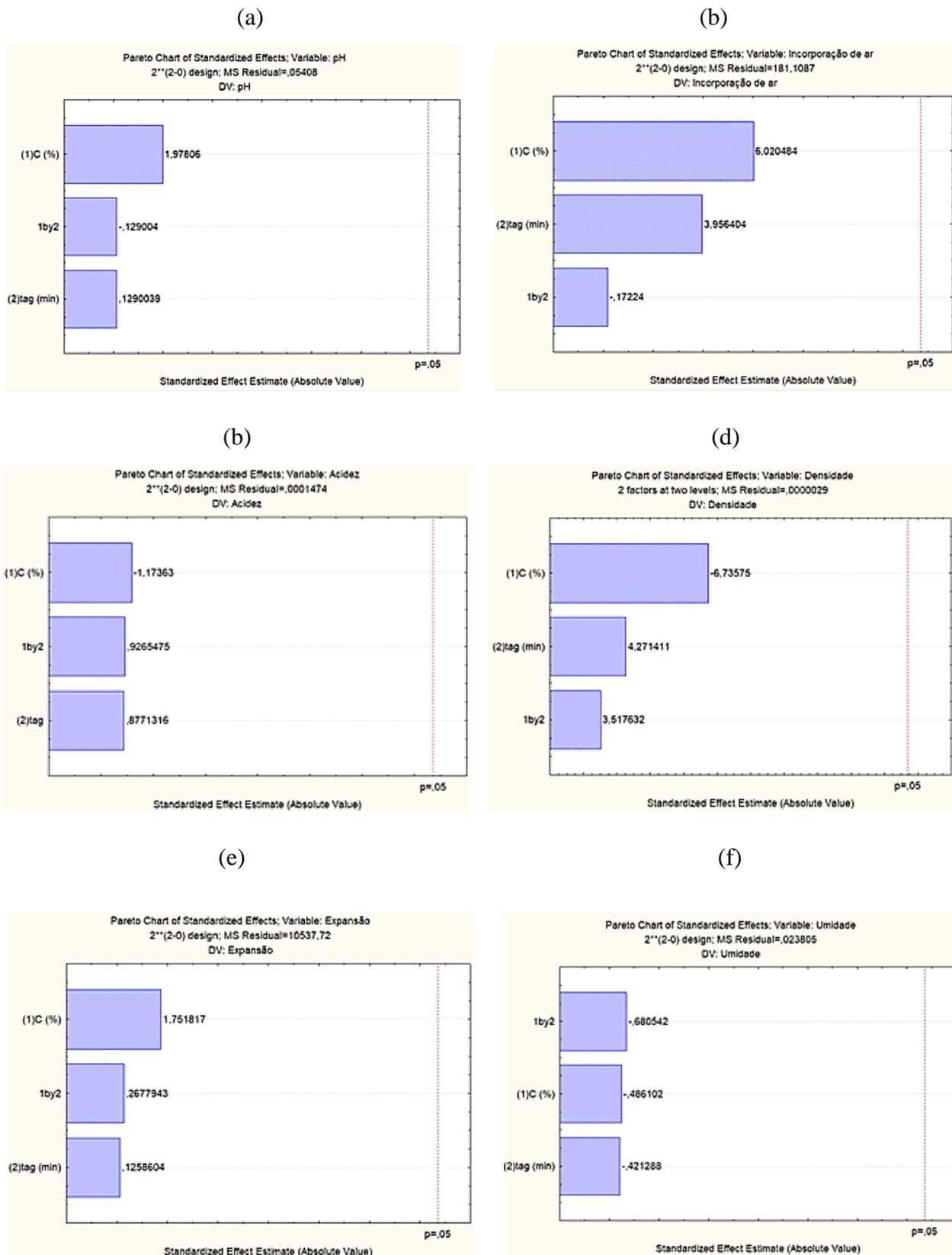
STRUMILLO, C. Z.; KUDRA, T. Drying: principles, applications and design. In: HUGHES, R. **Topics in chemical engineering**. UK: Gordon and Breach Science Publisher, v. 3, 1986.

TACO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. 2011. 4ª ed. Campinas: Unicamp. 161 p.

VILELA, N.J.; LUENGO, R. F. A. Produção de hortaliças folhosas no Brasil. **Campo & Negócios Online**, 2017. Disponível em:< <https://revistacamposenegocios.com/producao-de-hortalicas-folhosas-no-brasil>>. Acesso em: 24 out. 23.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Diagrama de Pareto para que não exerceram influência significativa a 95% de intervalo de confiança para espuma: (a) pH, (b) incorporação de ar, (c) acidez, (d) densidade, (e) expansão e (f) umidade. (Apendice de A a F – artigo 1).



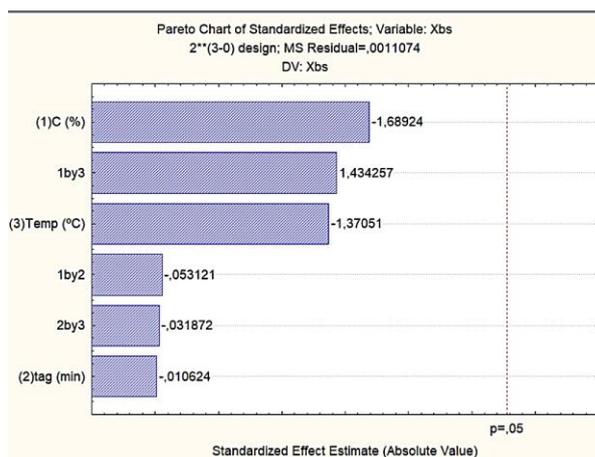
APÊNDICE B – Dados da ANOVA realizada para a variável tempo de secagem

ANOVA; Var.: t sec (min); R-sqr=.83562; Adj.:.58905 (Design tempo de secagem 2) 2**(3-0) design; MS Residual=735,2273 DV: t sec (min)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)C (%)	3200,00	1	3200,00	4,35240	0,105277
(2)tag (min)	200,00	1	200,00	0,27202	0,629523
(3)Temp (°C)	11250,00	1	11250,00	15,30139	0,017369
1 by 2	200,00	1	200,00	0,27202	0,629523
1 by 3	50,00	1	50,00	0,06801	0,807138
2 by 3	50,00	1	50,00	0,06801	0,807138
Error	2940,91	4	735,23		
Total SS	17890,91	10			

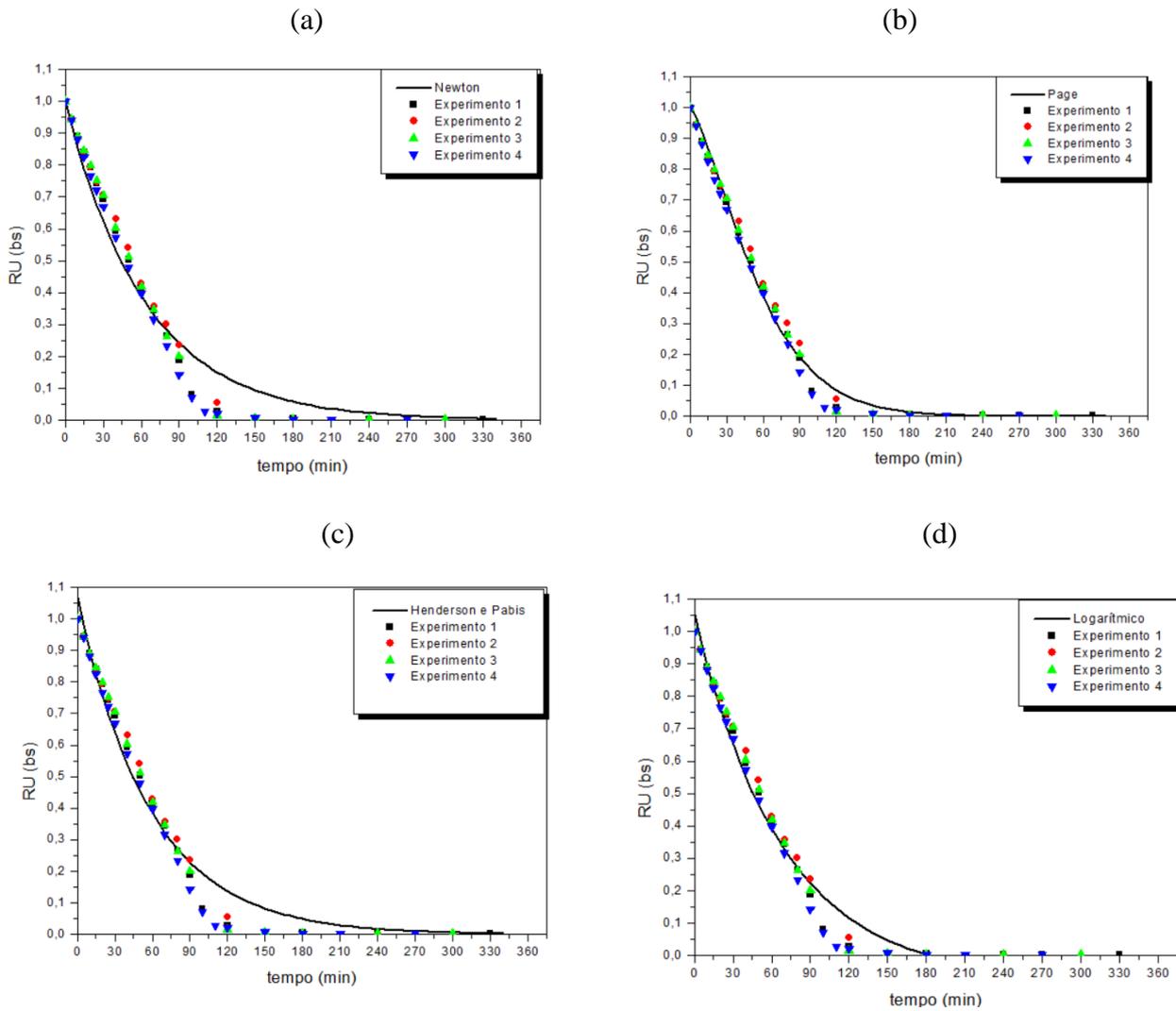
ANOVA; Var.: t sec (min); R-sqr=.83562; Adj.:.58905 (Design tempo de secagem 2) 2**(3-0) design; MS Pure Error=233,3333 DV: t sec (min)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)C (%)	3200,00	1	3200,00	13,71429	0,065801
(2)tag (min)	200,00	1	200,00	0,85714	0,452277
(3)Temp (°C)	11250,00	1	11250,00	48,21429	0,020117
1 by 2	200,00	1	200,00	0,85714	0,452277
1 by 3	50,00	1	50,00	0,21429	0,688915
2 by 3	50,00	1	50,00	0,21429	0,688915
Lack of Fit	2474,24	2	1237,12	5,30195	0,158681
Pure Error	466,67	2	233,33		
Total SS	17890,91	10			

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Teste F	
Regressão	14950	6	2491,67	$F_{cal} = 3,3890$	$F_{tab (0,95, 6;4)} = 6,163$
Resíduos	2940,91	4	735,2275		
Falta de ajuste	2474,24	2		Conclusão O modelo estudado não é significativo, pois $F_{cal} < F_{tab}$	
Erro Puro	466,67	2			
Total	17890,91	10			
R^2	83,56%				

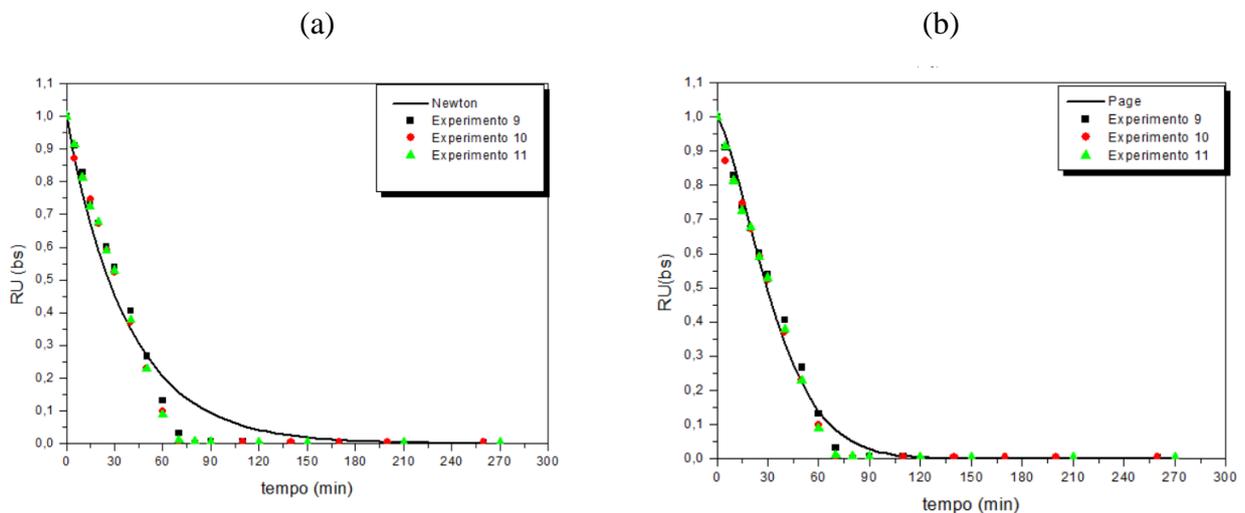
APÊNDICE C – Diagrama de Pareto para teor de umidade

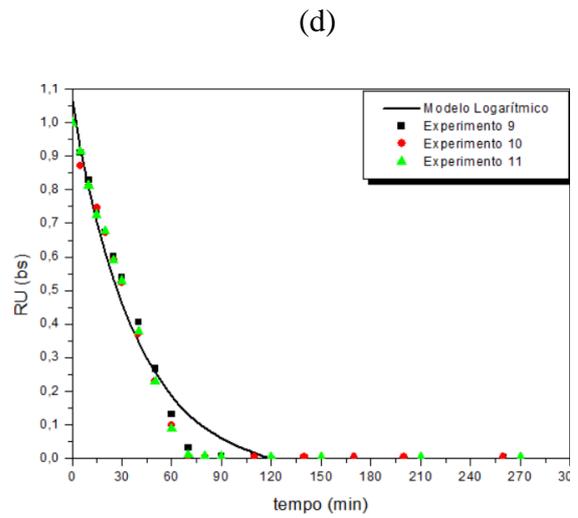
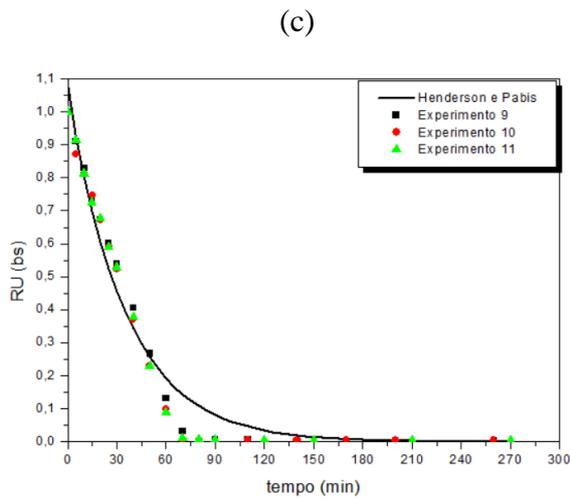


APÊNDICE D – Modelagem para a temperatura de 50 °C: (a) modelo Newton, (b) modelo Page, (c) modelo Henderson & Pabis e (d) modelo Logarítmico

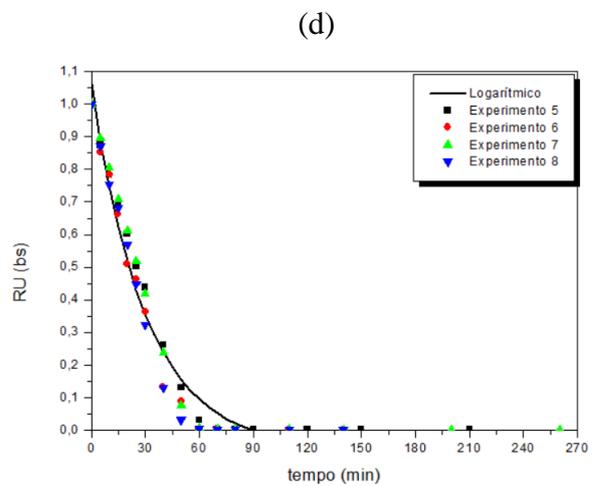
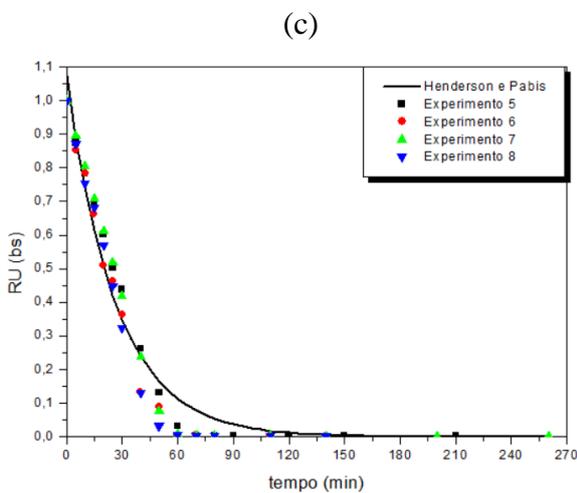
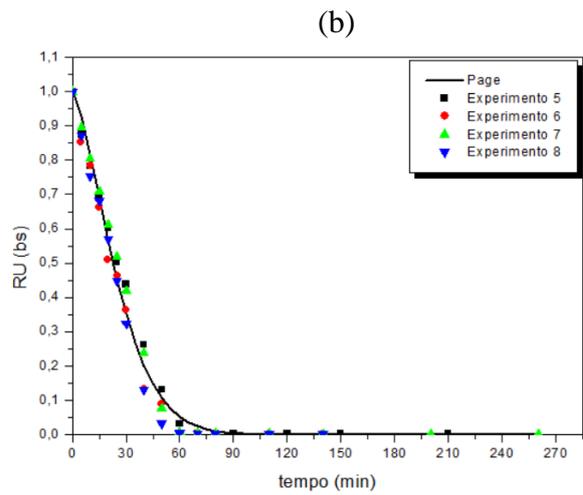
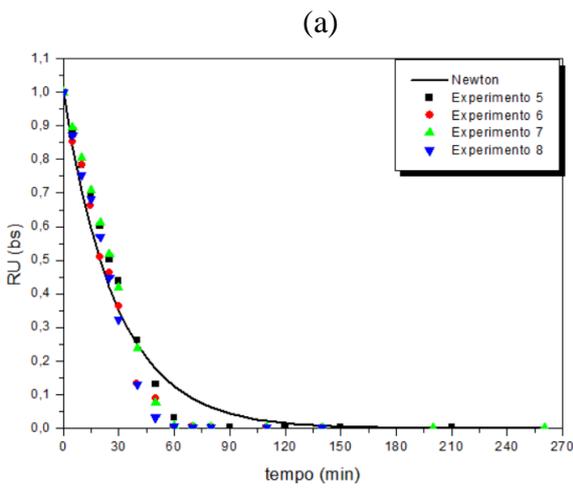


APÊNDICE E - Modelagem para a temperatura de 60 °C: (a) modelo Newton, (b) modelo Page, (c) modelo Henderson & Pabis e (d) modelo Logarítmico



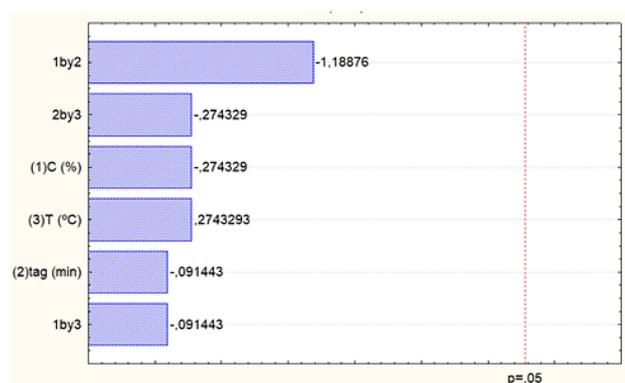


APÊNDICE F – Modelagem para a temperatura de 70 °C: (a) modelo Newton, (b) modelo Page, (c) modelo Henderson & Pabis e (d) modelo Logarítmico

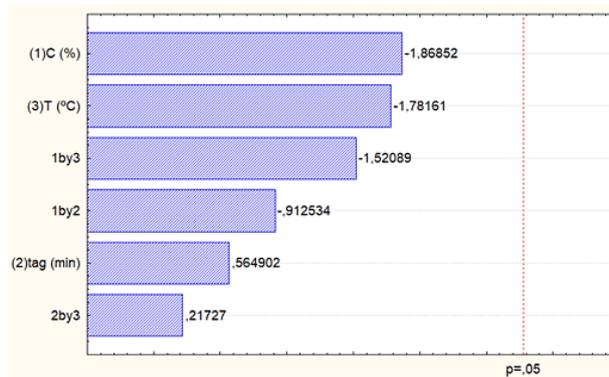


APÊNDICE G – Diagrama de Pareto para os parâmetros que não exerceram influência significativa a 95% de intervalo de confiança para pó da folha de espinafre: (a) sólidos solúveis, (b) acidez, (c) compostos fenólicos, (d) proteínas, (e) carboidratos, (f) cor a*, (g) cor b*, (h) cor C* e (i) cor ° h. (artigo 2)

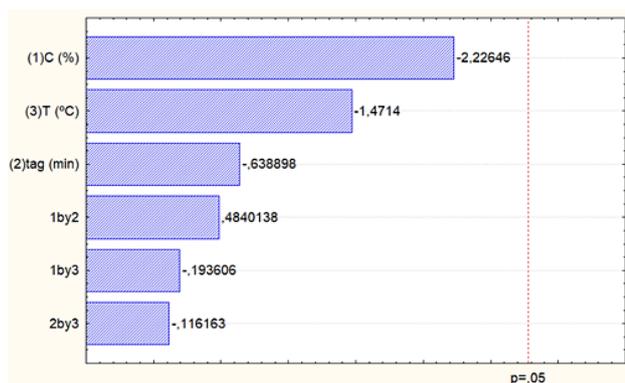
(a)



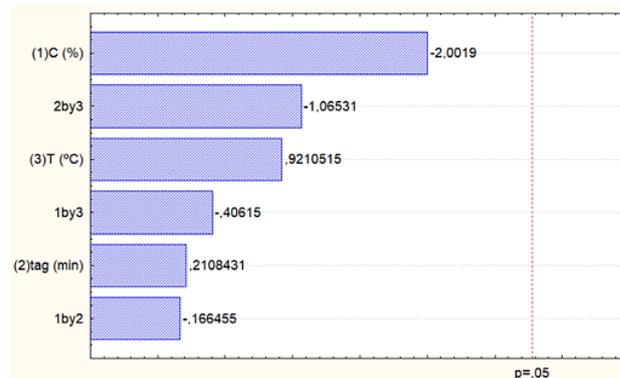
(b)



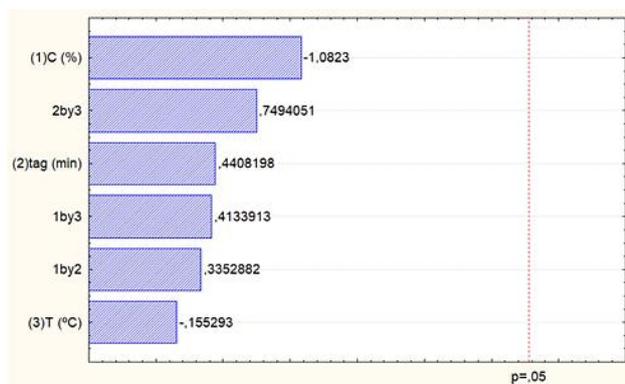
(c)



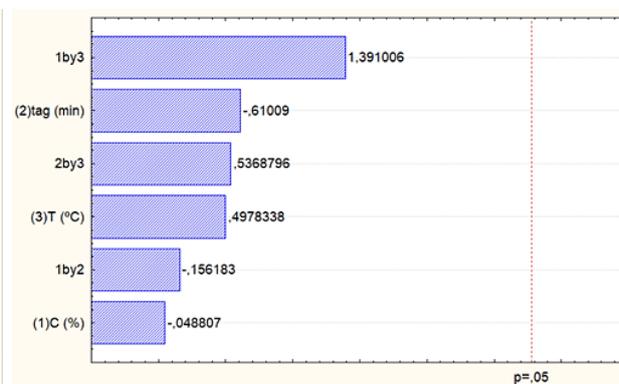
(d)



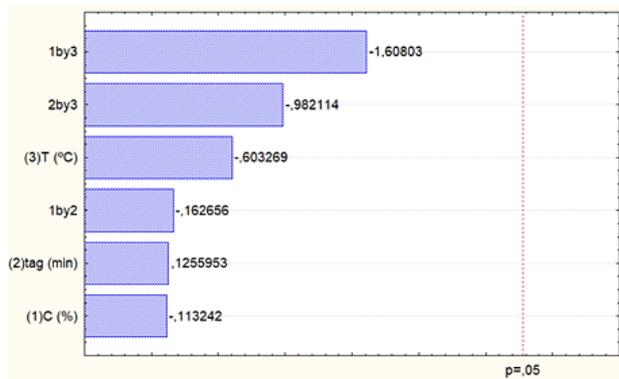
(e)



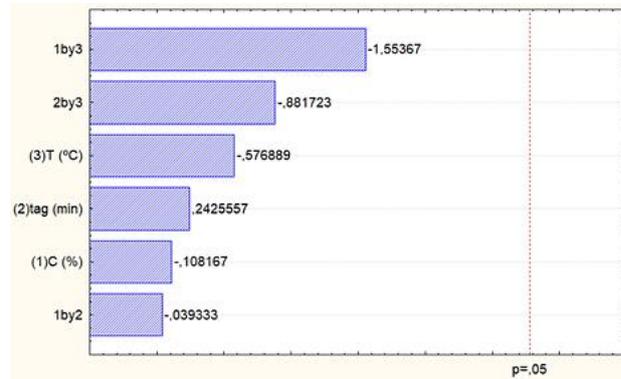
(f)



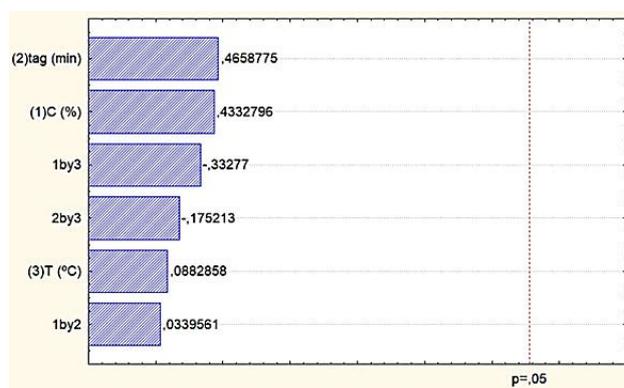
(g)



(h)



(i)



APÊNDICE H – Comprovante de depósito da patente

Patente: OBTENÇÃO DO PÓ DA FOLHA DE ESPINAFRE ATRAVÉS DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA.



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

Número do Processo: BR 10 2024 018949 3

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 24098477000110

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Cidade Universitária

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58059-900

País: Brasil

Telefone: (83) 32167558

**PETICIONAMENTO
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Petição Eletrônica em
13/09/2024 às 17:20, Petição 870240078816