



PRODUÇÃO DE CAFÉ SOLÚVEL: FORMAÇÃO DE ESPUMA DO EXTRATO DE CAFÉ E SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

MELISSA A. LOPES^{1*}, JORDANA A. FERNANDES¹, LIDJA D. M. S. BORÉL¹, RENATA A. B. LIMA-CORRÊA¹

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Setor de Engenharia Química
*e-mail: melissa.lobes@estudante.ufla.br

RESUMO – O Brasil possui o café como um dos produtos agrícolas mais importantes e, especialmente para Minas Gerais, tal *commodity* apresenta grande relevância no campo socioeconômico. O consumo interno de café solúvel tem aumentado significativamente nos últimos anos e uma técnica inovadora para a sua produção é a secagem em camada de espuma (*foam mat drying*), que promete atrativo energético aos olhos das indústrias. Neste trabalho, avaliou-se a melhor condição para a formação de espumas com baixa massa específica, alta viscosidade e estabilidade, visando posterior secagem pelo método *foam mat* para produção de café solúvel. Assim, verificou-se que a condição de 5,05% m/V de albumina com tempo de batimento de 6,5 minutos e velocidade de rotação de 1066,67 rpm produziram uma espuma com massa específica de 0,1983 g mL⁻¹, viscosidade de 1186,1 mPa.s, e estabilidade de 99,99%, alcançando uma desejabilidade de 0,8478. A espuma do extrato aquoso de café produzida nesta condição foi seca em diferentes temperaturas do ar de secagem (50, 70 e 90°C). Observou-se que o aumento da temperatura do ar de 50°C (SEC = 110,70±5,23 MJ Kg⁻¹) para 90°C (SEC = 57,97±6,27 MJ Kg⁻¹) permitiu a redução de 47,6% do consumo específico de energia.

INTRODUÇÃO

O Brasil tem o café como um dos produtos agrícolas mais importantes na produção e exportação. O estado de Minas Gerais responde por 54% da produção nacional, com praticamente 100% das plantações de café arábica (Oliveira et al., 2020).

No segmento de café solúvel, segundo a ABICS (2022), a demanda no ano de 2021, seja para consumo ou insumo de produtos à base de café, pode ser considerada recorde e, não apenas o mercado interno cresceu, mas também as exportações desse produto.

O café solúvel é o produto resultante da desidratação do extrato aquoso de café. O tipo *spray dried*, com maior volume comercializado, é obtido a altas temperaturas, o que pode resultar em perdas de aroma e sabor. Nesse sentido, a busca por tecnologias inovadoras e sustentáveis capazes de suprir a

demanda do agronegócio é fundamental para que o estado consolide sua participação no mercado interno e externo.

Uma tecnologia alternativa e de baixo custo que vem sendo investigada para a secagem de alimentos líquidos ou purês é a secagem em camada de espuma (*foam mat drying*) (Dehghannya et al., 2018; Nunes et al., 2022). Tal técnica mostra-se promissora pois, em geral, a secagem de materiais espumados permite que a operação seja conduzida em menores temperaturas e em um menor tempo (Thuwapanichayanan et al., 2008), o que pode diferenciar esse processo também do ponto de vista energético.

Muitas variáveis podem influenciar a capacidade de formação e estabilidade de espumas, tais como a concentração e o tipo de agente emulsificante, o tempo e o método de incorporação de ar (Franco et al., 2016). Assim, a avaliação de propriedades, como a massa

específica e a estabilidade da espuma na temperatura de desidratação, torna-se uma etapa crítica para o sucesso da técnica. Apesar disso, há poucos trabalhos na literatura dedicados a avaliar as etapas de formação e desidratação de espuma do extrato aquoso de café para a produção de café solúvel (Cruz et al., 2017; Maciel, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o processo de secagem em camada de espuma para a produção de café solúvel, através de um enfoque que inclui: (i) a avaliação da influência da concentração do emulsificante albumina, tempo e velocidade de batimento nas propriedades da espuma (massa específica, viscosidade e estabilidade), e (ii) o estudo do efeito da temperatura do ar de secagem (50, 70 e 90°C) sobre a cinética de secagem e o consumo específico de energia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para a realização dos experimentos, foi utilizado café do tipo 100% arábica disponibilizado pela Fazenda Três Porteiros, localizada em Ingaí – MG. Os aditivos utilizados foram: albumina (Asa Power) e goma xantana (Avante Consultoria e Ingredientes).

Formação da espuma

Extrato aquoso de café foi obtido por extração simples de 50 g de pó de café arábica com 300 mL de água aquecida a 90°C. Após o resfriamento do extrato à temperatura ambiente, este foi submetido ao processo de formação de espuma utilizando-se albumina e goma xantana como agentes emulsificante e estabilizante, respectivamente. A agitação mecânica foi realizada em batedeira doméstica (Philips, 600W) e após produção, as espumas foram imediatamente caracterizadas.

Caracterização da espuma

Massa específica: foi determinada (em duplicata) por picnometria utilizando um picnômetro de 25 mL previamente calibrado com água destilada.

Viscosidade: foi medida em duplicata utilizando-se um viscosímetro Brookfield

(modelo NDJ-5S) com rotor 3 e velocidade de rotação de 60 rpm.

Estabilidade: foi determinada conforme sugerido por Barmore (1934). Amostras de 10 g de espuma foram pesadas e dispostas sobre uma peneira. A peneira foi apoiada sobre um funil de vidro, sendo este conjunto inserido em uma proveta, como mostrado na Figura 1.



Figura 1: Ensaio experimental para a determinação da estabilidade das espumas.

O aparato permaneceu por 2h em uma estufa de convecção forçada de ar (modelo SL-102) na temperatura de 70°C. Após esse período, o volume coalescido foi medido e a estabilidade (E) calculada pela Equação 1:

$$E (\%) = \left(1 - \frac{V_{coalescido} \times \rho_{espuma}}{10}\right) \times 100 \quad (1)$$

Planejamento experimental

Os experimentos de formação da espuma foram realizados para avaliar a influência da concentração de albumina ([Alb]) e do tempo de batimento (t) sobre importantes propriedades da espuma (massa específica, viscosidade e estabilidade), através de um planejamento experimental 3^2 em duplicata compondo um conjunto de 18 experimentos. Os níveis de concentração de albumina investigados (3,5; 5,0 e 6,5% m/V) foram escolhidos em testes preliminares a partir do menor valor possível que resultou em espumas com massas específicas na faixa entre 0,1 e 0,6 g cm⁻³ (Van

Arsdel e Copley, 1964). Para o tempo de batimento, foram investigados os valores de 2,5; 7,5 e 12,5 minutos.

Esse conjunto experimental foi realizado para três níveis de velocidade de rotação da bateadeira (v_r), totalizando 54 experimentos. A velocidade de rotação foi uma variável não controlada e que foi medida utilizando um tacômetro SIMPLA (modelo TC 34). Os valores obtidos foram iguais a 975,67 rpm (nível 1); 1017 rpm (nível 2), e 1066,67 rpm (nível 3).

Os valores reais e codificados das variáveis independentes utilizados no planejamento experimental estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Planejamento Experimental Fatorial 3^2 com variáveis codificadas e reais.

Ensaio	[Alb] (% m/V)	t (min)
1	3,5 (-1)	7,5 (0)
2	3,5 (-1)	12,5 (1)
3	6,5 (1)	7,5 (0)
4	5,0 (0)	12,5 (1)
5	5,0 (0)	2,5 (-1)
6	3,5 (-1)	2,5 (-1)
7	6,5 (1)	2,5 (-1)
8	5,0 (0)	7,5 (0)
9	6,5 (1)	12,5 (1)

Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o *software* Statistica 7.0, assumindo um nível de confiança de 95%. Assim, avaliou-se a significância estatística dos efeitos da concentração de albumina, tempo de batimento e da velocidade de rotação (considerada uma variável bloco) sobre as propriedades da espuma (massa específica, viscosidade e estabilidade a $T=70^\circ\text{C}$).

Em seguida, foram obtidas equações para predição das propriedades da espuma em função da concentração de albumina e do tempo de batimento através de regressão múltipla, sendo para cada variável resposta gerado um modelo de acordo com a Equação 2.

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_{12} XY + \beta_{11} X^2 + \beta_{22} Y^2 \quad (2)$$

em que: Z é a variável resposta, β_0 é o coeficiente de regressão associado à média, β_1 e β_2 aos efeitos lineares, β_{11} e β_{22} aos efeitos quadráticos e β_{12} ao efeito de interação; X e Y são as variáveis independentes codificadas.

Vale ressaltar que apenas os coeficientes com nível de significância de 5% ($p < 0,05$) foram apresentados.

Por fim, a função desejabilidade (D) foi utilizada para identificar a condição operacional que levasse à formação de uma espuma com propriedades desejáveis à secagem em camada de espuma. Para isso foi calculada uma desejabilidade individual (d_i) para cada variável resposta (\hat{y}_i). Para a variável a ser minimizada (massa específica) foi utilizada a Equação 3 e para as serem maximizadas (viscosidade e estabilidade), se utilizou a Equação 4.

$$d_i = \begin{cases} 1 & \hat{y}_i < T_i \\ \left(\frac{Y_i - U_i}{T_i - U_i}\right)^{r_i} & T_i \leq \hat{y}_i \leq U_i \\ 0 & \hat{y}_i > U_i \end{cases} \quad (3)$$

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < L_i \\ \left(\frac{Y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^{r_i} & L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i \\ 1 & \hat{y}_i > T_i \end{cases} \quad (4)$$

em que U_i é o valor máximo admissível; L_i é o valor mínimo admissível; T_i é o valor ótimo e r_i é uma função desejabilidade linear ($r_i = 1 \forall i$).

A desejabilidade global D foi, então, calculada pela combinação das N desejabilidades individuais d_i assumindo a mesma importância para as variáveis respostas através da Equação 5.

$$D = \left(\prod_{i=1}^N d_i \right)^{\frac{1}{N}} \quad (5)$$

Secagem em camada de espuma

A condição ótima de formação da espuma do extrato aquoso de café foi utilizada para a produção de espumas a serem desidratadas pelo método *foam mat*. Após produzida, a espuma foi disposta em bandeja circular de 20,0 cm de diâmetro e 1,0 cm de espessura e submetida ao processo de secagem em uma estufa com circulação forçada de ar investigando-se o

efeito da temperatura do ar de secagem em três níveis (50, 70 e 90°C).

A perda de umidade das amostras foi obtida pela pesagem das bandejas a cada 10 min durante os primeiros 100 min de secagem e, então, a cada 20 min até peso constante. Ao final do processo, o material foi raspado da bandeja com o auxílio de uma espátula e a umidade final determinada via método gravimétrico a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24h (AOAC, 1990). Esta umidade foi considerada como a umidade de equilíbrio.

O adimensional de umidade (MR) foi calculado pela Equação 6 e utilizado para a construção das curvas de cinética de secagem para as diferentes temperaturas avaliadas.

$$\text{MR} = \frac{M(t) - M_{\text{eq}}}{M_0 - M_{\text{eq}}} \quad (6)$$

em que $M(t)$ é a umidade da amostra no instante t , M_0 é a umidade inicial da espuma, e M_{eq} é a umidade de equilíbrio, todas em base seca.

A taxa de secagem (DR) foi obtida conforme Equação 7.

$$\text{DR} = -\frac{dM}{dt} = -\frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (7)$$

em que M_t e $M_{t+\Delta t}$ são valores de umidade obtidos nos tempos t e $t + \Delta t$, respectivamente.

Consumo Específico de Energia (SEC)

O consumo específico de energia é um parâmetro crucial na avaliação da eficiência energética do processo de secagem, pois relaciona a energia consumida à quantidade de água evaporada, conforme mostra a Equação 8. Neste trabalho, os valores de SEC (MJ Kg^{-1}) foram determinados com base na energia requerida para secar as espumas desde seu conteúdo de umidade inicial até um valor final igual a 40,215% (b.u.).

$$\text{SEC} = \frac{P_{\text{total}} \cdot t}{m_{\text{água evaporada}}} \quad (8)$$

em que P_{total} é a potência total consumida, t representa o tempo de secagem e $m_{\text{água evaporada}}$ é a massa de água que foi evaporada até o tempo t .

A potência total consumida foi medida para cada uma das temperaturas (50, 70 e 90°C) através do uso de um Wattímetro Minipa (modelo ET-4080). Os valores de SEC foram expressos em média \pm desvio padrão de duas réplicas. Diferenças significativas ($p < 0,10$) foram avaliadas pelo teste de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efeito da concentração de albumina e tempo de batimento nas propriedades da espuma

A partir da execução dos testes de formação da espuma em cada condição experimental investigada foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 2.

Segundo Van Arsdel e Copley (1964), a massa específica de espumas para a secagem deve estar entre 0,1 e 0,6 g cm^{-3} . Observa-se na Tabela 2 que esta característica foi alcançada para todas as condições investigadas, independente da velocidade de rotação.

A estabilidade das espumas variou entre 93,98 e 100 % (com $v_r = 975,67$ rpm), 94,53 e 100% (com $v_r = 1017$ rpm) e 89,25 e 100% (com $v_r = 1066,67$ rpm). Os altos valores refletem o pequeno volume de líquido drenado independente da velocidade de rotação e indicam que as espumas podem ser consideradas mecanicamente estáveis (Kudra e Ratti, 2006). Este é um resultado almejado, pois se a estrutura da espuma colapsa, há efeitos negativos sobre o processo e a qualidade final do produto.

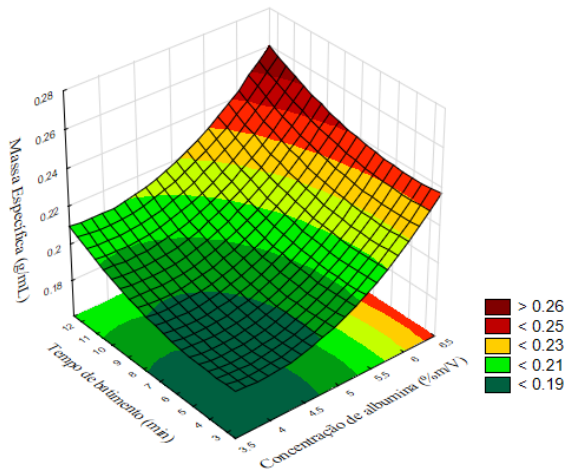
Em relação à viscosidade, era esperado um comportamento similar à estabilidade, o que pôde ser constatado pelos resultados apresentados na Tabela 2 (e pelas Figuras 2, 3 e 4). Isso ocorre, pois, a drenagem do líquido pode ser reduzida pela adição de partículas (aumento da massa de aditivos, por exemplo) ou pelo aumento da viscosidade do material (Hardy e Jideani, 2017).

Tabela 2: Resultados obtidos para as propriedades da espuma (viscosidade, massa específica e estabilidade) formada em cada condição investigada.

975,67 rpm				
[Alb] (% m/V)	t (min)	η (mPa.s)	ρ (g/mL)	E (%)
3,5 (-1)	7,5 (0)	832,00±22,63	0,1835±0,0007	95,78±0,27
3,5 (-1)	12,5 (1)	829,00±1,41	0,2065±0,0106	94,85±0,05
6,5 (1)	7,5 (0)	884,00±22,63	0,2440±0,0056	97,04±0,01
5,0 (0)	12,5 (1)	908,00±33,94	0,2310±0,0014	96,08±0,30
5,0 (0)	2,5 (-1)	769,50±12,02	0,1790±0,0014	95,89±0,28
3,5 (-1)	2,5 (-1)	592,00±124,45	0,1945±0,0078	93,98±0,04
6,5 (1)	2,5 (-1)	1256,50±77,07	0,2425±0,0021	100,00±0,00
5,0 (0)	7,5 (0)	1190,00±62,22	0,1995±0,0007	100,00±0,00
6,5 (1)	12,5 (1)	1071,00±29,70	0,2500±0,0014	100,00±0,00
1017 rpm				
[Alb] (% m/V)	t (min)	η (mPa.s)	ρ (g/mL)	E (%)
3,5 (-1)	7,5 (0)	1036,00±2,83	0,2025±0,0078	97,38±0,19
3,5 (-1)	12,5 (1)	811,00±21,21	0,2105±0,0078	97,90±0,08
6,5 (1)	7,5 (0)	1118,00±67,88	0,2190±0,0014	98,47±0,32
5,0 (0)	12,5 (1)	899,00±21,21	0,2525±0,0021	98,49±0,01
5,0 (0)	2,5 (-1)	721,00±0,00	0,2025±0,021	94,53±0,23
3,5 (-1)	2,5 (-1)	1088,00±127,3	0,2045±0,0021	98,77±0,59
6,5 (1)	2,5 (-1)	730,00±0,00	0,2360±0,0000	94,81±0,01
5,0 (0)	7,5 (0)	1018,00±16,97	0,1930±0,0000	99,62±0,01
6,5 (1)	12,5 (1)	1290,00±11,31	0,2855±0,0049	100,0±0,00
1066,67 rpm				
[Alb] (% m/V)	t (min)	η (mPa.s)	ρ (g/mL)	E (%)
3,5 (-1)	7,5 (0)	935,50± 36,06	0,1680±0,0028	97,48±0,29
3,5 (-1)	12,5 (1)	744,50± 61,52	0,1920±0,0071	96,16±0,13
6,5 (1)	7,5 (0)	1369,00±52,33	0,2275±0,0035	100,0±0,00
5,0 (0)	12,5 (1)	598,00± 22,63	0,2625±0,0035	89,25±0,51
5,0 (0)	2,5 (-1)	727,00± 9,90	0,2240±0,0014	93,96±0,35
3,5 (-1)	2,5 (-1)	1122,00±28,28	0,2025±0,0021	98,48±0,16
6,5 (1)	2,5 (-1)	863,00± 35,36	0,2225±0,0021	97,33±0,03
5,0 (0)	7,5 (0)	1003,00±38,18	0,200±0,0014	99,20±0,00
6,5 (1)	12,5 (1)	808,00± 2,83	0,2885±0,0007	95,39±0,02

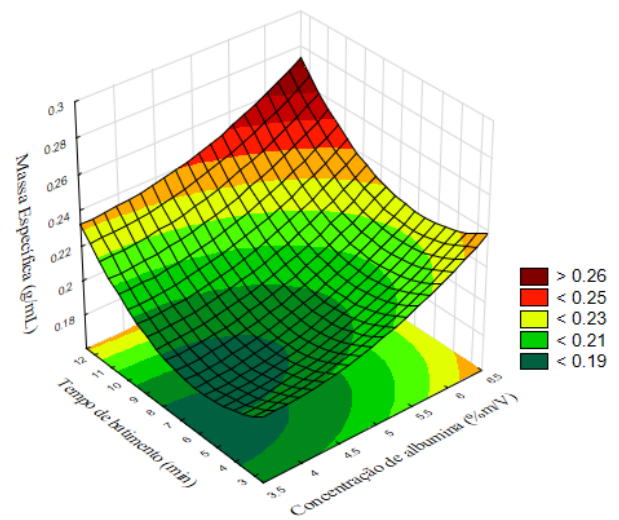
Na Figura 2 são apresentadas as superfícies de resposta ajustadas para a massa específica como função da concentração de albumina e do tempo de batimento para cada um dos níveis de velocidade de rotação: (a)

975,67 rpm; (b) 1017 rpm e (c) 1066,67 rpm. A equação ajustada para cada variável resposta é também apresentada (Equações 9 a 11).



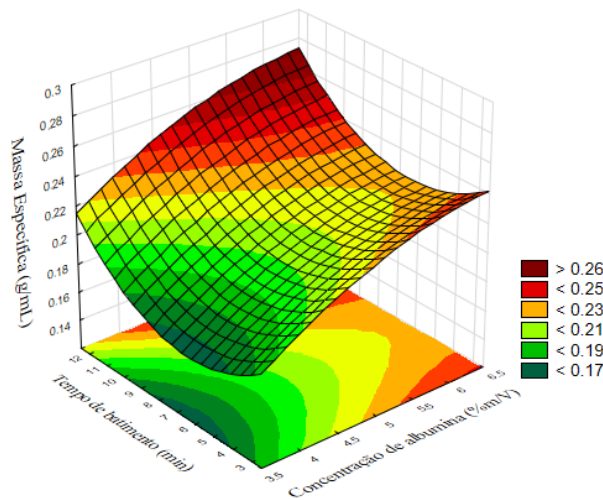
$$\rho = 0,30 - 0,06[\text{Alb}] + 0,01[\text{Alb}]^2 - 0,003t + 0,0003t^2 \quad (9)$$

(a)



$$\rho = 0,28 - 0,03[\text{Alb}] + 0,004[\text{Alb}]^2 - 0,01t + 0,001t^2 \quad (10)$$

(b)



$$\rho = 0,03 + 0,073[\text{Alb}] - 0,005[\text{Alb}]^2 - 0,02t + 0,001t^2 \quad (11)$$

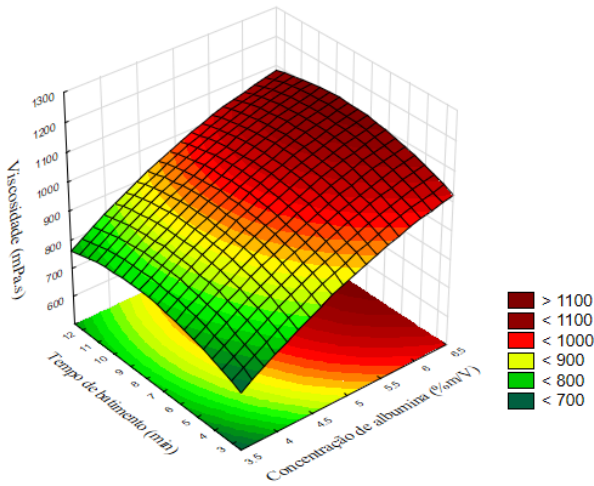
(c)

Figura 2: Superfície de resposta para a massa específica com (a) $v_r = 975,67$ rpm (b) $v_r = 1017$ rpm e (c) $v_r = 1066,67$ rpm.

Segundo Ng e Sulaiman (2018), espumas com menor massa específica apresentam, como consequência, maior área superficial disponível à secagem. Devido às maiores taxas de transferência de massa, a remoção de umidade é, nesse caso, acelerada. Nota-se pela Figura 2 que, de forma geral, o uso de menores tempos de batimento juntamente ao uso de menores teores de albumina levaram à produção de espumas com menor massa específica. Isso ocorre, pois, segundo Hardy e Jideani (2017), quando aprisionada no líquido, o tamanho da bolha de ar é maior. Contudo, com o uso prolongado de agitação mecânica, essas bolhas são ‘quebradas’ em bolhas menores. Assim, possivelmente, o maior volume de ar

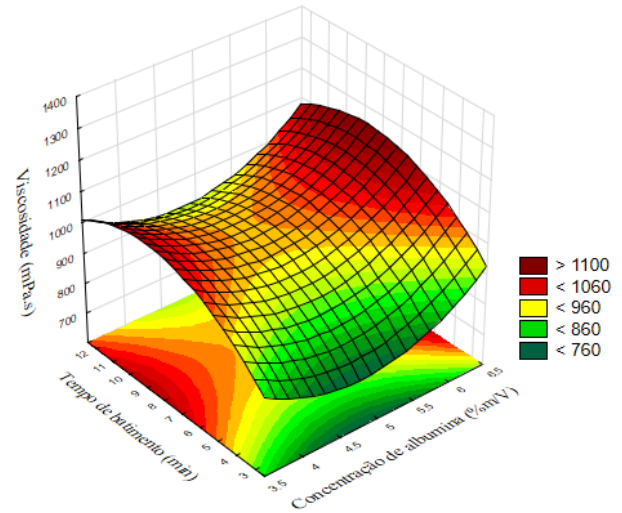
incorporado ao líquido obtido em menores tempos de batimento, junto à menor adição do aditivo albumina podem ter levado à obtenção de menores densidades. As Equações 9, 10 e 11 evidenciam a influência direta da concentração de albumina nessa propriedade.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as superfícies de resposta ajustadas para a viscosidade e estabilidade em cada um dos níveis de velocidade de rotação em conjunto com as equações ajustadas (Equações 12 a 17). Inicialmente, vale destacar que essas propriedades apresentaram comportamentos similares, o que era esperado, pois espumas mais viscosas apresentam menor fluidez e, consequentemente, maior estabilidade.



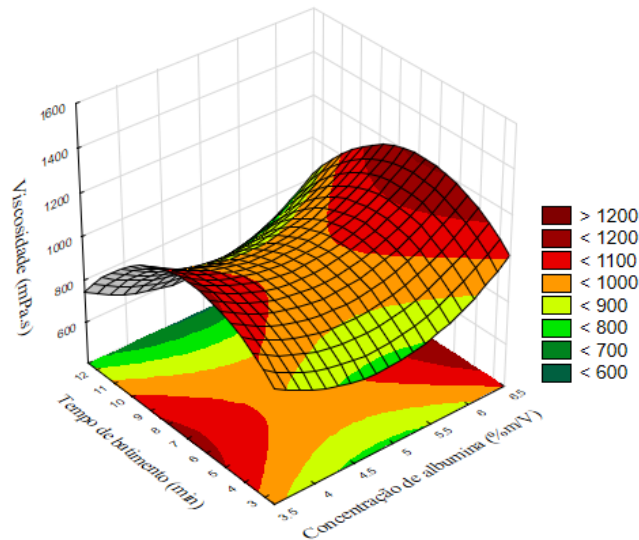
$$\eta = -226,95 + 306,87[\text{Alb}] - 20,04[\text{Alb}]^2 + 44,93t - 2,57t^2 \quad (12)$$

(a)



$$\eta = 1914,80 - 567,81[\text{Alb}] + 59,04[\text{Alb}]^2 + 95,87t - 5,37t^2 \quad (13)$$

(b)



$$\eta = 2517,98 - 852,07[\text{Alb}] + 87,85[\text{Alb}]^2 + 156,53t - 11,68t^2 \quad (14)$$

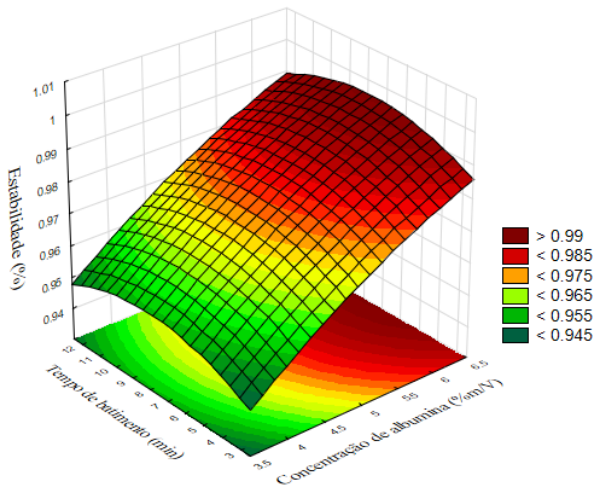
(c)

Figura 3: Superfície de resposta para a viscosidade com (a) $v_r = 975,67$ rpm (b) $v_r = 1017$ rpm e (c) $v_r = 1066,67$ rpm.

Assim, para se obter espumas de maiores viscosidade e estabilidade a fim de a espuma não coalescer durante a secagem, nota-se nas Figuras 3 e 4, que foi necessário o uso de concentrações mais elevadas de albumina, independente do tempo e velocidade de agitação. Contudo, pode-se verificar que com o aumento da velocidade de batimento ($v_r=1017$ e $1066,67$ rpm) o uso de menores concentrações de albumina também resultou em maiores viscosidades e elevadas estabilidades, como mostram as Figuras 3b, 4b, 3c e 4c, respectivamente. Esses resultados evidenciam a

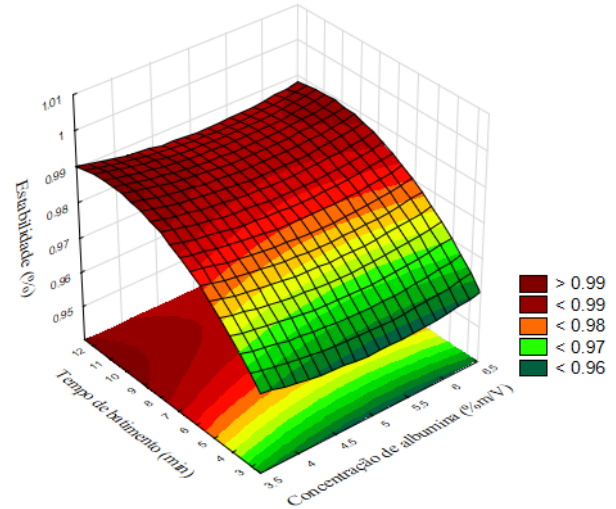
influência da velocidade de agitação no comportamento das propriedades da espuma de café e concordam com A et al., 2015, que relatam que a quantidade e tamanho final das bolhas depende, dentre outros fatores, da velocidade do agitador. O comportamento obtido aqui pode estar relacionado ao fato de que o volume de ar incorporado na espuma aumenta com a intensidade da agitação. Em adição, quando ‘presa’ no líquido, o tamanho das bolhas de ar é maior, sendo estas posteriormente ‘quebradas’ em bolhas menores pela ação do agitador (Hardy e Jideani, 2017).

Isso favorece a formação de espumas mais estáveis, mesmo com o uso de menores concentrações do emulsificante albumina.



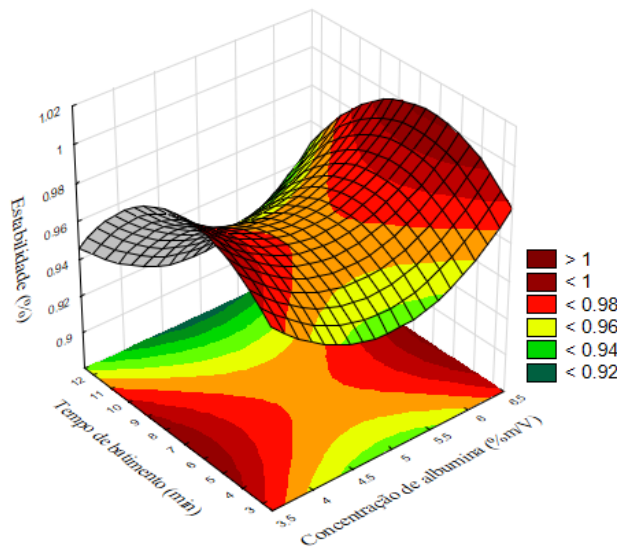
$$E = 0,85 + 0,03[\text{Alb}] - 0,0017[\text{Alb}]^2 + 0,005t - 0,0003t^2 \quad (15)$$

(a)



$$E = 0,98 - 0,016[\text{Alb}] + 0,0015[\text{Alb}]^2 + 0,009t - 0,00043t^2 \quad (16)$$

(b)



$$E = 1,27 - 0,15[\text{Alb}] + 0,015[\text{Alb}]^2 + 0,02t - 0,002t^2 \quad (17)$$

(c)

Figura 4: Superfície de resposta para a estabilidade com (a) $v_r = 975,67$ rpm (b) $v_r = 1017$ rpm e (c) $v_r = 1066,67$ rpm.

Assim, foi efetuado um tratamento estatístico global dos 54 experimentos, empregando-se uma otimização de múltiplas respostas com o intuito de identificar uma condição para obtenção de uma espuma com baixa massa específica e altas viscosidade e estabilidade. Essa avaliação foi feita através da função desejabilidade, cujo resultado é apresentado na Figura 5.

Como pode ser visto na Figura 5, a desejabilidade alcançada foi de 0,8478, que corresponde a uma viscosidade de 1186,1 mPa.s, massa específica de 0,1983 g mL⁻¹ e estabilidade de 99,99%. Tal desejabilidade global é classificada como muito boa por Lazic (2006) e ocorre para a condição de tempo -0,2; concentração de albumina 0,033 e nível 3 da velocidade de rotação. Decodificando esses valores, a condição operacional ótima usada

nos experimentos de secagem foi uma concentração de albumina de 5,05 % m/V, tempo de batimento de 6,5 minutos e velocidade de rotação de 1066,67 rpm.

Os valores das propriedades da espuma obtidos nessa condição foram validados experimentalmente e os resultados foram similares aos encontrados na análise de desejabilidade global (em geral, as variações se

encontram dentro da faixa de desvios): massa específica de $0,1984 \pm 0,0023 \text{ g mL}^{-1}$; viscosidade de $1150,00 \pm 39,60 \text{ mPa.s}$ e estabilidade de $95,74 \pm 0,14\%$, sendo, então, utilizados para a produção das espumas a serem secas em camada de espuma.

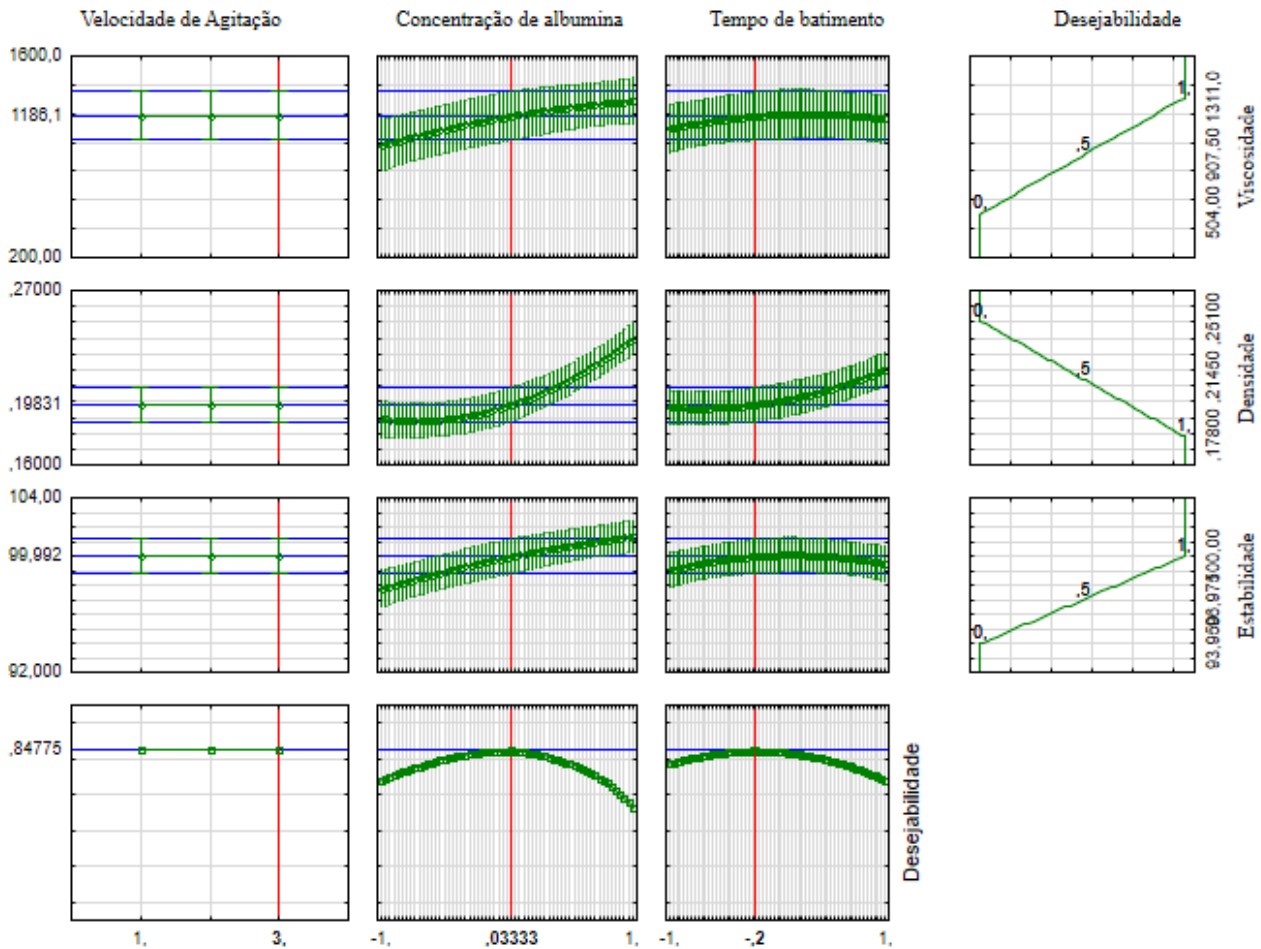


Figura 5: Otimização por desejabilidade da formação da espuma para a maximização simultânea da viscosidade e estabilidade e minimização da massa específica.

Curvas de Secagem

A espuma do extrato aquoso produzida na condição ótima foi desidratada pelo método *foam mat* em diferentes temperaturas do ar de secagem (50, 70 e 90°C). Na Figura 6 mostram-se as curvas do adimensional de umidade (MR) em função do tempo de secagem e na Figura 7 são apresentadas as curvas de taxa de secagem em função do tempo para as três temperaturas investigadas.

A partir da Figura 6, é possível notar que o aumento da temperatura do ar de secagem de

50 para 90°C, reduz o tempo de secagem das espumas em aproximadamente 2 vezes. Pela Figura 7 é possível observar ainda que, para o mesmo aumento na temperatura do ar de secagem, a taxa de secagem é aumentada por um fator de 2,5, considerando os períodos de taxa constante. Este comportamento está de acordo com o esperado, pois quanto maior a diferença entre a temperatura do ar de secagem e da espuma, maior a força motriz para o processo de transferência de calor ocorrer, o que acelera a secagem e, conseqüentemente, resulta em maiores taxas (Borges et al., 2022).

Nota-se ainda na Figura 7, que o período de taxa de secagem constante foi predominante na desidratação das espumas de café. Conforme Borges et al. (2022), este resultado pode ser justificado pelo aumento da área superficial

com a formação da espuma, que faz com que a migração de umidade do interior para a superfície do material seja rápida o suficiente para compensar a umidade perdida na evaporação.

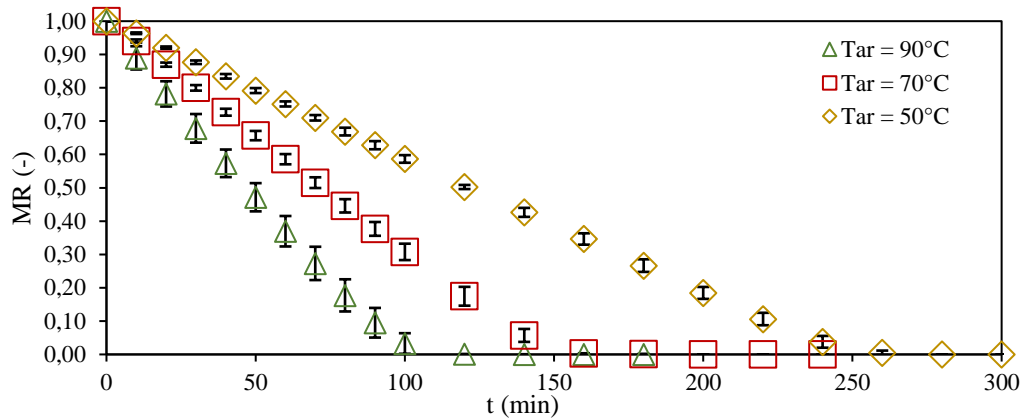


Figura 6: Adimensional de umidade em função do tempo durante a secagem do extrato de café em camada de espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.

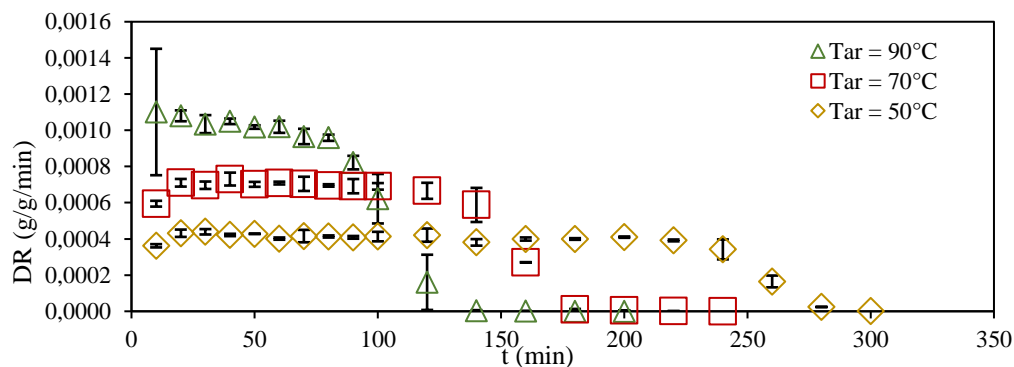


Figura 7: Curvas de taxa de secagem da amostra de espuma nas temperaturas de 50, 70 e 90°C.

É importante ressaltar ainda que o período de taxa constante foi maior com o uso de menores temperaturas. Para $T_{ar}=50^{\circ}C$, esse período se estendeu até aproximadamente 240 min de secagem, enquanto para a secagem realizada com $T_{ar}=90^{\circ}C$, é possível observar a transição para o período decrescente, em que o mecanismo difusivo controla o processo, após aproximadamente 80 min. Esse comportamento também era esperado visto que a secagem ocorre mais rapidamente com o uso de $T_{ar}=90^{\circ}C$ e, assim, a migração de umidade do interior para a superfície da espuma não é capaz de repor a evaporação superficial a partir de um menor tempo de processo.

Consumo Específico de Energia

Na Tabela 3 são apresentados os valores de SEC obtidos na secagem em camada de

espuma do extrato de café com a temperatura variando entre 50 e 90°C.

Tabela 3: SEC para a secagem da espuma obtida a partir do extrato aquoso de café.

T_{ar} ($^{\circ}C$)	SEC (MJ/Kg)
50	$110,70^a \pm 5,23$
70	$77,41^b \pm 2,40$
90	$57,97^c \pm 6,27$

Nota: Letras diferentes indicam diferença significativa ($p < 0,10$) de acordo com o Teste de Tukey.

Como pode ser observado nos resultados mostrados na Tabela 3, aumentar a temperatura do ar de 50°C para 70°C e então para 90°C, implica uma redução de 30,1% e 47,6% do consumo específico de energia, respectivamente. Essa diminuição era esperada e está de acordo com as constatações de Borges

et al. (2022) e Kumar et al. (2022), pois o aumento na temperatura do ar de secagem eleva as taxas de secagem (ver Figura 6), reduzindo o tempo de processo e resultando em um menor consumo de energia. Este resultado é importante, pois segundo Silva (2015), dentre os produtos da indústria de alimentos e bebidas, a produção de café solúvel, comumente realizada empregando a secagem por pulverização, apresenta o segundo maior consumo específico em MJ/t para cada tonelada de café solúvel produzido.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o planejamento experimental conduzido permitiram constatar a influência das variáveis concentração de albumina, tempo e velocidade de batimento nas propriedades massa específica, viscosidade e estabilidade da espuma de café. Observou-se que utilizando uma menor concentração de albumina em conjunto com menores tempos de batimento, a massa específica era minimizada, conforme o requerido. Com o uso da menor velocidade de rotação ($v_r=975,67$ rpm), era necessário um maior teor de albumina para maximizar estabilidade e viscosidade, independente do tempo de batimento, já com o uso de maiores velocidades ($v_r=1017$ e $1066,67$ rpm), um tempo intermediário de batimento foi constatado, em conjunto com uma maior massa específica, para se obter altas estabilidade e viscosidade.

A condição operacional ótima para o processo de formação da espuma de café foi identificada como: concentração de albumina 5,05 % m/V, tempo de batimento de 6,5 minutos e velocidade de rotação de 1066,67 rpm. A espuma resultante é considerada de muito boa qualidade ($D=0,8478$), com massa específica de $0,1983 \text{ g mL}^{-1}$, viscosidade de 1186,1 mPa.s e estabilidade de 99,99%. Tal estimativa foi validada em laboratório e, como valores similares para as propriedades da espuma foram encontrados, a condição ótima foi utilizada para a produção da espuma a ser desidratada.

A secagem das espumas produzidas a partir do extrato aquoso de café com o uso da técnica *foam mat* permitiu a obtenção de um

produto em pó (café solúvel). As curvas de secagem mostraram uma clara influência da temperatura do ar de secagem, sendo o período com taxa constante predominante, especialmente com o uso de menores temperaturas. Nesse sentido, notou-se que a elevação da temperatura de 50 para 90°C reduziu o tempo do processo, elevou as taxas de secagem e reduziu o consumo específico de energia (de 110,70 para 57,97 MJ/kg).

Ainda que preliminares, esses resultados mostram que a técnica de secagem em camada de espuma pode ser promissora para a produção de café solúvel.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A, S.; VENKATACHALAM, S.; JOHN, S.G.; HUPPUSWAMY, K. Foam mat drying of food materials: a review. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 39, p. 3165-3174, 2015.
- ABICS. Associação Brasileira da Indústria de Café Solúvel. RELATÓRIO do Café Solúvel do Brasil. 2022. Disponível em: <<https://agenciap1.files.wordpress.com/2022/01/relatorio-cafe-soluvell-brasil-janeiro-2022.pdf>>. Acesso em: 01 de jun. de 2022.
- Analytical Chemists. 15. ed. [s.l.] Washington, 1990. v. 2
- AOAC. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 15. ed. [s.l.] Washington, v.2, 1990.
- BORGES, H. M. A.; BORÉL, L. D. M.; LIMA-CORRÊA, R. A. B. (2022). Effects of temperature and foam layer thickness on collard greens powder production by foam mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 00, e16755.
- CRUZ, P. L.; SARAIVA, S. H.; TEIXEIRA, L. J. Q. Otimização do processo de secagem em leito de espuma de extrato

- de café. Enciclopédia Biosfera, v.14, n.26, p. 478-492, 2017.
- DEHGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, G.; GHAFFARI, H. Heat and mass transfer modelling during foam mat drying of lime juice as affected by different ovoalbumin concentration. *Journal of Food Engineering*, v.238, p. 164-177, 2018.
- FRANCO, T. S. et al. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT-Food Science and Technology*, v. 66, p. 503–513, 2016.
- HARDY, Z.; JIDEANI, V. A. (2017). Foam-mat drying technology: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57, 2560–2572.
- KUDRA, T.; RATTI, C. Foam-mat drying: Energy and cost analyses. *Canadian Biosystems Engineering*, v. 48, p. 3.27–3.32, 2006.
- KUMAR, A.; KANDASAMY, P.; CHAKRABORTY, I.; HANGSHING, L. Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer. *Biosystems Engineering*, v. 219, p. 85-102, 2022.
- LAZIC, Z. R. Design of experiments in chemical engineering: a practical guide. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006
- MACIEL, K. S. (2017). Otimização das condições do processo de secagem do extrato de café em leito de espuma e aplicação em mistura para cappuccino. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Espírito Santo, 98p.
- NG, M. L.; SULAIMAN, R. Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. *LWT*, v. 88, p. 80-86, 2018.
- NUNES, G., NASCIMENTO, B. S.; LIMA-CORRÊA, R. A. (2022). Development of carrot top powders using foam mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 00, e16487.
- OLIVEIRA, K. R.; FERREIRA, W. P. M.; FONSECA H. P.; SOUZA, C. F. Influência da temperatura e altitude na expansão da cultura do café nas matas de Minas, Brasil. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 28, p. 157-165, 2020.
- SILVA, Andressa Carla Cintra da. Análise termoeconômica de um sistema de trigação em uma indústria de alimentos. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.
- THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering*, v. 86, n. 4, p. 573–583, 2008.
- VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, C. M. J., Food dehydration. Westport, Connecticut: The Avi Publishing Company, 1964. v. 2, 721p.