



SECAGEM VIA MICRO-ONDAS DAS FOLHAS DE AROEIRA (*Schinus terebinthifolius* Raddi) E AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA COR

PAULO S. SANTOS JUNIOR^{1*}, MARIA C. FERREIRA²

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química

*e-mail: paulo.santos@estudante.ufscar.br

RESUMO - Este trabalho objetivou avaliar a cinética de secagem das folhas de aroeira em secador micro-ondas, para identificar o efeito de diferentes potências de irradiação no comportamento da secagem, e analisar a influência da secagem na cor das folhas. Para isso, as folhas foram caracterizadas em função das dimensões e propriedades físico-químicas. Ensaios de secagem foram realizadas para potências específicas variando de 0,37 W/g a 5,52 W/g com duas massas de material *in natura* (40 e 80g de aroeira). Foram avaliadas as taxas de secagem e ajustadas equações semi-empíricas aos dados experimentais. A degradação da cor das folhas foi avaliada pelo espaço de cores do sistema CIE $L^*a^*b^*$. Observou-se que o aumento da potência aplicada reduziu os tempos de secagem, pois a geração de energia térmica aumenta para maiores potências de irradiação. Potências inferiores a 1,36 W/g resultaram em secagem lenta, no período de taxa constante. Para potências acima de 2,36 W/g, a secagem ocorreu em taxa decrescente. A equação baseada no modelo Logarítmico, com 4 parâmetros de ajuste, foi a que melhor descreveu as cinéticas de secagem das folhas de aroeira para potências iguais ou acima de 2,36 W/g. A potência de 0,56 W/g preservou melhor a qualidade das folhas.

INTRODUÇÃO

A aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) é uma espécie vegetal pertencente à família *Anacardiaceae*, presente no Cerrado brasileiro cujas folhas são utilizadas para o tratamento de diversas patologias humanas por apresentarem propriedades biológicas e farmacológicas comprovadas, tais como: atividade bactericida, anti-inflamatória e antioxidante (Degáspari *et al.* 2014; Carvalho *et al.* 2013).

Estudos relatam que as propriedades presentes nesta espécie são creditadas aos compostos bioativos da planta, que exercem a função de auxiliar nas atividades fisiológicas e bioquímicas do corpo humano. As folhas de aroeira são ricas nesses compostos, que podem ser recuperados em extratos obtidos a partir das folhas *in natura* ou secas (Pinho *et al.* 2012).

Tendo em vista que após a colheita as plantas iniciam um processo de degradação

irreversível devido a sua elevada umidade inicial, é mais comum o processamento logo após a colheita, visando evitar a deterioração e possibilitando a preservação da qualidade do material (Rosanova, 2017).

A secagem é um dos métodos mais convenientes para preservação das plantas medicinais, visto que agrega valor ao produto, aumenta o tempo de prateleira e reduz o desperdício, uma vez que neutraliza ou impede ações enzimáticas que contribuem para a deterioração das plantas. Além desses benefícios, a secagem facilita o manuseio, transporte e armazenamento do material. Entretanto, a secagem térmica de folhas oferece vários desafios porque trata-se de um material biológico com características morfológicas variáveis e composição sensível à temperatura. Assim, o processo precisa ser realizado em condições operacionais adequadas para preservar a qualidade do material (Schiffmann, 1995; Canabarro, 2019).

Pesquisas têm sido conduzidas na busca por alternativas para melhores condições de secagem de folhas medicinais. A secagem em micro-ondas se mostra uma alternativa promissora para a redução da umidade de materiais vegetais (Chua *et al.* 2019; Torki-Harchegani *et al.* 2018). Diferentemente dos métodos de secagem convencionais em que a energia é transferida por condução, convecção ou radiação térmica, no secador a micro-ondas, a energia é fornecida diretamente ao material por ondas eletromagnéticas emitidas na faixa de frequências entre 300 MHz e 300 GHz (Schiffmann, 1995), que provocam o aquecimento dielétrico do produto. Neste mecanismo, a radiação eletromagnética emitida pelo *magnéton* é absorvida pelo material e se propaga em seu interior. Sob a ação da radiação eletromagnética as moléculas de água contidas no produto são agitadas por rotação dipolar e a agitação em nível molecular dissipa energia na forma de calor (Oliveira e Franca, 2002). Através dessa técnica, o material vegetal é rapidamente aquecido, possibilitando a remoção da umidade.

No processo, as micro-ondas promovem um fluxo de calor na mesma direção do fluxo de umidade (do interior para a superfície do material), aumentando a taxa de secagem e reduzindo o tempo de processamento, com menor modificação na estrutura do material em comparação à secagem com ar aquecido (Xu *et al.* 2017). Outra vantagem desse método é a elevada eficiência energética, já que a maior parte da energia eletromagnética é convertida em calor. No entanto, a aplicação das micro-ondas pode resultar em aquecimento não uniforme de certos produtos, dependendo de suas propriedades dielétricas e termofísicas. A secagem via micro-ondas também pode ser combinada com processos convencionais, contribuindo para melhorias na qualidade dos produtos secos, com alta qualidade nutricional e sensorial (Monteiro *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2006).

A cor, aparência e aroma das folhas secas influenciam na aceitação do produto pelo consumidor e parâmetros associados a cor são geralmente avaliados como um indicativo da qualidade do processo de secagem (Soysal, 2005; Baritax *et al.* 1992). Diversos autores afirmam que a degradação da cor durante a

secagem deve-se à deterioração dos pigmentos de cor verde, tais como clorofila e antocianinas, em processos que envolvem reações químicas enzimáticas de mecanismos complexos. De acordo com Sarimeseli (2011), a secagem via micro-ondas de folhas de coentro preservou a coloração das folhas secas e resultou em um produto de cor verde intensa, com leve escurecimento se comparado às folhas *in natura*.

Portanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a redução de umidade das folhas de aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi.) via secagem em micro-ondas, visando a preservação da qualidade do material seco. Para isso foi efetuada a caracterização das folhas e analisada a influência da potência aplicada na cinética de secagem, na taxa de aquecimento e na preservação da cor das folhas.

MATERIAL E MÉTODOS

Material vegetal

A secagem foi realizada no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. As folhas de aroeira *Schinus terebinthifolius* Raddi (Figura 1) utilizadas foram provenientes de árvores cultivadas no campus da própria universidade, sendo selecionadas folhas saudáveis e com boa aparência. A coleta foi realizada entre os meses de fevereiro e junho de 2022.



Figura 1: Ramo com folhas de aroeira.

Dimensões Características

As folhas de aroeira foram caracterizadas inicialmente através da determinação do conteúdo de umidade (em base úmida e seca) pelo método gravimétrico em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24h (AOAC, 1990) e

massa específica aparente, por picnometria líquida com água destilada.

Foram utilizadas 50 folhas para determinação das dimensões características. Com o auxílio do software ImageJ foram obtidas a área projetada, área superficial, volume. A espessura das folhas foi mensurada utilizando-se um paquímetro digital Caliper com precisão de 0,01 mm. Para obter o valor médio da espessura de cada folha, foram realizadas medidas em quatro posições diferentes ao longo da superfície foliar. A esfericidade foi estimada com base na equação de Mohsenin (1980) que relaciona o comprimento, a largura e espessura das folhas.

Aferição da potência do micro-ondas

O micro-ondas utilizado permite o ajuste de potências nominais variáveis. Segundo James *et al.* (2002) os micro-ondas domésticos possuem diferentes performances de potência aplicada e eficiência de aquecimento, que podem divergir das características operacionais descritas pelo fabricante devido à variação e posição da carga no interior do forno. Sendo assim, é necessário avaliar a relação entre a potência nominal e real, de forma a garantir a reprodução dos dados experimentais e análise correta dos resultados (Fumagalli, 2003).

Neste estudo, a aferição foi efetuada pelo método calorimétrico, medindo-se a variação de temperatura alcançada para uma massa conhecida de água submetida a potências nominais variando entre 120 W e 360 W. A massa de água utilizada variou entre 95 a 195 g, de acordo com a potência utilizada neste estudo. Assumindo-se que toda a potência fornecida pelo forno micro-ondas foi transformada em energia térmica na água, calculou-se a potência real absorvida pela água para diferentes potências nominais.

Ensaio de secagem

Os experimentos de secagem foram realizados em secador micro-ondas doméstico White-Whestinghouse (Figura 2), modelo EM 3500B, 1350 W de potência e frequência de 2450 Hz.



Figura 2: Secador micro-ondas

O estudo foi realizado com secagem em diferentes potências reais que variaram de 0,37 W/g a 5,52W/g. Para cada condição de secagem foram efetuadas medidas em duplicata.

Amostras de 40g ou de 80g de folhas eram dispostas em bandejas de plástico (15,4cm x 22,5cm) para a secagem, a espessura do leito da amostra das folhas foi mantida constante, igual a 4 cm. A perda de massa foi verificada em intervalos de tempo pré-definidos por meio de uma balança digital com precisão de três casas decimais (modelo BG 400 da marca Gehaka).

A secagem das folhas prosseguiu até que o produto atingisse umidade de 11% (b.u.). Para cada intervalo de pesagem monitorou-se a temperatura da superfície da amostra em três diferentes posições do leito de folhas, com o auxílio do termômetro de infravermelho (modelo UT3000A, marca Contemp, precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$).

Com os dados obtidos através da secagem, foram calculados o adimensional de umidade (MR) e a taxa de secagem (dX/dt), através das equações 1 e 2.

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X_{t-dt} - X_t}{dt} \quad (2)$$

Onde: MR é a umidade adimensional, X_t é a umidade da folha em um tempo t de secagem, X_i é a umidade inicial das folhas de aroeira e X_e é a umidade de equilíbrio dinâmico obtida no final da secagem, d_t é o intervalo de tempo entre 2 medidas consecutivas.

Equações de cinética de secagem

Os dados das curvas de adimensional de umidade (MR) em função do tempo foram ajustados a quatro equações semi-empíricas (Tabela 1), selecionadas entre as mais comumente utilizadas para descrever a cinética de materiais biológicos. Os parâmetros das equações de cinética de secagem foram estimados através do ajuste de regressão não linear por meio do software Origin®.

Tabela 1: Equações empíricas de cinética de secagem.

Modelo	MR	Eq
Lewis (LEWIS, 1921)	$\exp(-k \cdot t)$	(3)
Logarítmico (CHANDRA, 1995)	$a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(4)
Henderson e Pabis (HENDERSON; PABIS, 1961)	$a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(5)
Page (PAGE, 1949)	$\exp(-k \cdot t^n)$	(6)

Onde k na equação de Lewis é denominada constante de secagem (em min^{-1}); nas demais equações k, a, b e n são parâmetros de ajuste cujas dimensões variam de acordo com a equação.

Os critérios usados para determinação do melhor ajuste das equações aos dados experimentais foram o coeficiente de determinação (R^2), o Qui quadrado (X^2) e a soma quadrática dos resíduos (SQR), calculados pelas Equações 6 e 7, respectivamente. Quanto mais altos os valores de R^2 e mais baixos os de X^2 e RMSE melhor a qualidade do ajuste das equações.

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_{exp} - y_{mod})^2}{nn - NN} \quad (7)$$

$$SQR = \sum_{i=1}^n (y_{exp} - y_{mod})^2 \quad (8)$$

Onde: y_{exp} é o valor experimental, y_{mod} é o valor predito pelo modelo, nn é o número de observações experimentais e NN é o número de parâmetros de ajuste.

Degradação da cor

Com o intuito de avaliar a qualidade do produto após a secagem, foram analisadas as variações de cor das folhas secas em relação às folhas *in natura* pelo sistema de cores CIE $L^*a^*b^*$. As medidas de tonalidades foram efetuadas usando um espectrofotômetro CM-5 da marca Konica Minolta, com luminosidade D65, 10° do ângulo de observação e diâmetro de abertura de medição de 8 mm. Os valores de L^* , a^* , b^* e a^*/b^* foram comparados e avaliou-se a variação total da cor (ΔE^*) a partir da Equação 9.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_f^* - L_i^*)^2 + (a_f^* - a_i^*)^2 + (b_f^* - b_i^*)^2} \quad (9)$$

Onde: ΔE^* representa a diferença total de cor, L é o parâmetro que caracteriza a luminosidade, a^* é o parâmetro que caracteriza a intensidade das cores vermelho ($a^* > 0$) e verde ($a^* < 0$) e b^* é o parâmetro caracteriza a intensidade das cores amarelo ($b^* > 0$) e azul ($b^* < 0$). Além disso, o subscrito f representa a folha após a secagem, enquanto i é usado para a folha *in natura*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos a seguir, serão apresentados os resultados da caracterização da aroeira *in natura*, os ensaios de secagem e a análise da degradação da cor das folhas.

Dimensões Características

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para as dimensões características e propriedades físico-químicas das folhas de aroeira.

As folhas apresentaram uma baixa esfericidade (0,13), elevada área superficial ($24,3 \pm 3,5 \text{ cm}^2$) e volume pequeno ($0,68 \pm 0,09 \text{ cm}^3$). Considerando a morfologia das folhas, esses resultados são característicos e estão de acordo com os valores citados na literatura para as diversas espécies de folhas (Canabarro, 2019; Freitas, 2015; Lima, 2013; Rosanova, 2017; Silva, 2021).

Tabela 2: Propriedades físico-químicas das folhas de aroeira *in natura*.

Propriedades	Valor
Umidade (b.s)	1,82±0,07
Umidade (b.u) (%)	65,09±0,01
Massa específica aparente (g/cm ³)	0,72±0,01
Espessura (mm)	0,28±0,02
Largura (cm)	3,0±0,4
Comprimento(cm)	6,1±0,7
Área projetada (cm ²)	12±2
Área superficial (cm ²)	24±4
Volume (cm ³)	0,68±0,09
Esfericidade	0,13

O conteúdo de umidade obtido para as folhas de aroeira *in natura* foi de 1,82, em base seca e 65±0,01%, em base úmida. Os valores obtidos estão de acordo com os encontrados com Goneli *et al.* (2014) e Silva (2021) para as folhas de aroeira (65% e 66% em base úmida, respectivamente).

Ao analisar os desvios padrões das medidas realizadas nas folhas de aroeira, os valores mais significativos foram para área projetada (14%), área superficial (14%) e volume (14%), sendo os demais entre 1 a 11% em relação ao valor médio, para a massa específica, espessura, comprimento e largura, respectivamente. Os desvios relativamente elevados são esperados para as folhas, tendo em vista que as dimensões e perfis químicos das plantas medicinais podem variar com fatores associados ao período sazonal, características do material e época do cultivo.

Aferição da potência do micro-ondas

A Figura 3 apresenta os resultados da aferição da potência e mostra a energia absorvida pela massa de água em função da potência nominal aplicada.

É possível constatar que para potências nominais abaixo de 200 W há uma diferença significativa entre a potência nominal aplicada e a potência real, e que os valores tendem a se aproximar para potências acima de 300 W.

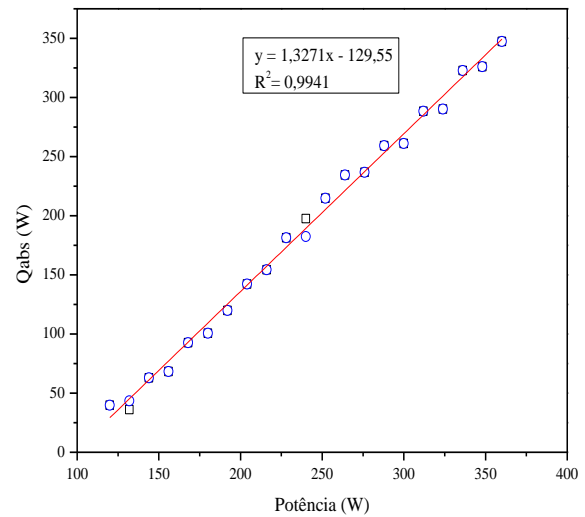


Figura 3: energia absorvida em função da potência aplicada.

A equação ajustada apresentou R^2 igual a 0,9948 e desvio padrão médio equivalente a 2%, variando de 1% a 10%. Para a realização dos experimentos, uma vez fixada a potência de aquecimento desejada, utilizou-se a equação de aferição para estimar a potência nominal correspondente. Os resultados apresentados a seguir serão discutidos com base nos valores de potência específica reais utilizados nos experimentos.

Secagem via micro-ondas

A fim de identificar o efeito de diferentes potências de irradiação na cinética de secagem das folhas de aroeira, foram obtidos dados experimentais de umidade em função do tempo de secagem.

A Figura 4 apresenta as curvas de secagem obtidas para diferentes massas, quando submetidas à secagem em micro-ondas com potências variando de 0,37 W/g a 5,52 W/g. Os dados apresentados correspondem a média entre os ensaios efetuados em duplicata e as barras de erro indicam os desvios-padrão. Pode-se observar, na Figura 4, que os desvios padrão entre ensaios efetuados em condições idênticas foram pequenos, evidenciando a boa reprodutibilidade das curvas.

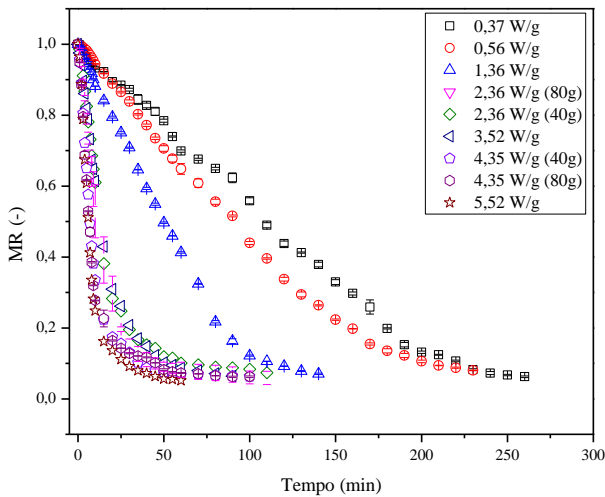


Figura 4: Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios com diferentes massas de folhas e potências.

Avaliando-se o efeito das condições de massa e potência aplicada para as folhas de aroeira, foi possível verificar que quanto maior a potência menor será o tempo de secagem do material. Por exemplo, o tempo de secagem foi reduzido de 260 minutos para 60 minutos quando a potência de secagem aumentou de 0,37 W/g para 5,52 W/g. A redução do tempo de secagem é esperada porque o aumento da potência aplicada implica em aumento da energia absorvida pela amostra, o que contribui para uma maior agitação das moléculas de água contidas do interior das folhas de aroeira e maior dissipação de energia térmica, resultando em aquecimento mais rápido e mais intenso do material.

Para uma dada potência específica, a variação da massa da amostra (de 40g para 80g) não influenciou as curvas de cinética de secagem, conforme pode ser visto na Figura 5. Para melhor visualização, esta figura mostra apenas os resultados obtidos para massas distintas submetidas a idênticas potências específicas.

Pode ser observado também na Figura 4 que ao utilizar potências inferiores a 1,0 W/g, a queda de umidade foi bem mais lenta em comparação com as demais potências utilizadas. Nessas condições a taxa de aquecimento é muito baixa e insuficiente para manter uma taxa elevada de vaporização de água. Ao analisar as potências acima de 2,36 W/g, nota-se que o aumento da potência teve menor influência na velocidade de secagem das folhas, indicando que a remoção de umidade

não é mais limitada pelo fornecimento de energia.

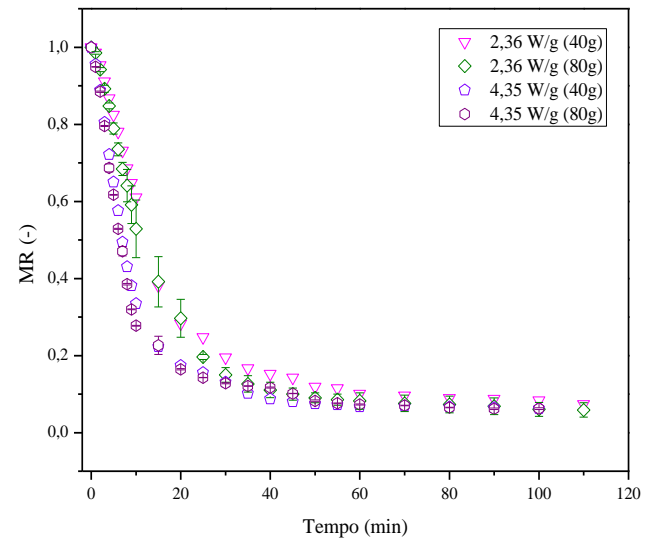


Figura 5: Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios com diferentes massas de folhas e potências iguais.

De acordo com Zhang *et al.* (2006), se a energia convertida a partir das micro-ondas for maior do que a necessária para a evaporação da água, pode ocorrer superaquecimento do material. No caso das folhas, isso pode provocar danos à estrutura foliar e degradação dos princípios ativos.

A influência da potência também pode ser observada nas curvas de taxa de secagem demonstradas na Figura 6. Para facilitar a visualização, são mostrados na Figura 6 os resultados para os limites de potência inferior e superior, e para alguns valores intermediários (0,56 W/g, 1,36 W/g, 2,36 W/g e 5,52 W/g).

A cinética de secagem para as folhas de aroeira é caracterizada por diferentes etapas. A energia das micro-ondas é convertida em energia térmica no interior do material. Inicialmente, a temperatura da amostra aumenta, até que a pressão de vapor de água no interior do material atinge um valor maior do que no ambiente e a umidade começa a ser removida. No período intermediário a taxa de secagem é elevada, e cai até valores próximos de zero a medida que a quantidade de umidade no interior da amostra diminui.

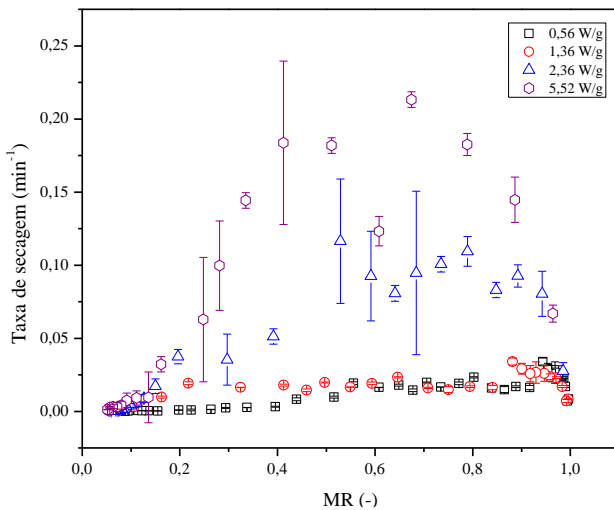


Figura 6: Taxa de secagem em função da umidade adimensional para secagem das folhas de aroeira em diferentes potências.

Ao se avaliar as curvas para 0,56 W/g e 1,36 W/g é possível observar que as secagens nestas potências ocorreram com taxas muito baixas, com um período inicial de indução, no qual a amostra é aquecida, seguido por um longo período de secagem a taxa constante. Nessas condições, a taxa de secagem está sendo limitada pelo fornecimento de energia. As curvas para 2,36 W/g e 5,52 W/g apresentam o período inicial de indução, seguido por um período de secagem a taxa decrescente. A secagem em taxa decrescente sugere que o processo é controlado por mecanismos internos de migração de umidade (capilaridade, pressão interna estabelecida e difusão) (Fumagalli, 2003; Rosa, 2010).

Os valores de taxa aumentaram com a elevação da potência aplicada, pois as potências mais altas dissipam mais calor interno para o material. Assim, as maiores de taxas de secagem foram encontradas para a secagem a 5,52 W/g ($0,123 \text{ min}^{-1}$), seguida por 2,36 W/g ($0,10 \text{ min}^{-1}$) e 1,36 W/g ($0,032 \text{ min}^{-1}$). No período intermediário da secagem as taxas são altas e diminuem gradativamente devido à redução da umidade da amostra.

Para uma avaliação do aquecimento do material mediu-se a temperatura da superfície da amostra ao longo da secagem. A Figura 7 mostra a variação da temperatura da amostra (T_f) em função da umidade.

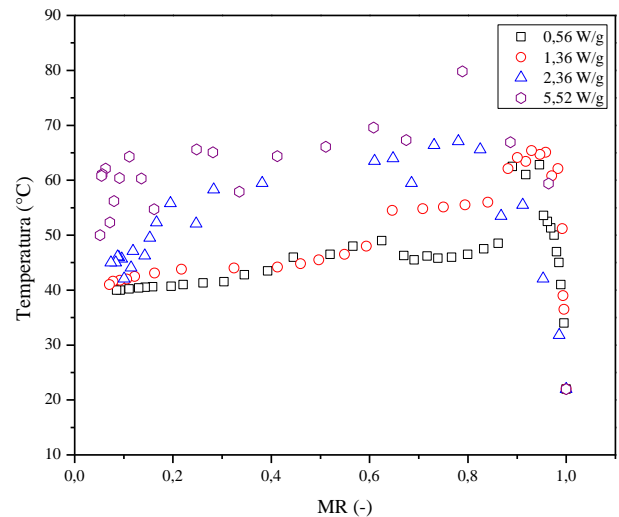


Figura 7: Temperatura das folhas em função da umidade.

É possível verificar que a temperatura da superfície da amostra aumentou com a elevação da potência aplicada, visto que as maiores temperaturas foram observadas para a potência de 5,52 W/g e as menores para as potências de 0,56 W/g e 1,36 W/g.

Ao analisar a Figura 7 percebe-se que a variação da temperatura segue um padrão “similar” ao apresentado na Figura 6 para as taxas de secagem. Nota-se o aumento brusco da temperatura no início da secagem, o que caracteriza o rápido aquecimento do material. Nesse período, parte da energia fornecida está sendo usada para o aquecimento do material, caracterizando o período de indução. Após o aquecimento do material, toda a energia é utilizada para remoção da umidade, região em que a taxa de secagem atinge valores elevados, enquanto a temperatura decai gradualmente até o fim da secagem. Segundo Schiffman (1995) a remoção de água faz com que a constante dielétrica do material diminua e assim o aquecimento tende a ser menor. Nota-se que para as maiores potências, a temperatura da superfície da amostra manteve-se abaixo de 65°C durante a maior parte do tempo de secagem.

Ajustes da equação de secagem

Com base nos dados experimentais obtidos para cinética de secagem, foram feitos os ajustes as equações semi-empíricas de Lewis, Henderson e Pabis, Logarítmico e Page. A Figura 8 representa as curvas de secagem ajustadas para o modelo Logarítmico em

comparação com os dados experimentais nas potências de 0,56 W/g, 1,36 W/g, 2,36 W/g e 5,52 W/g.

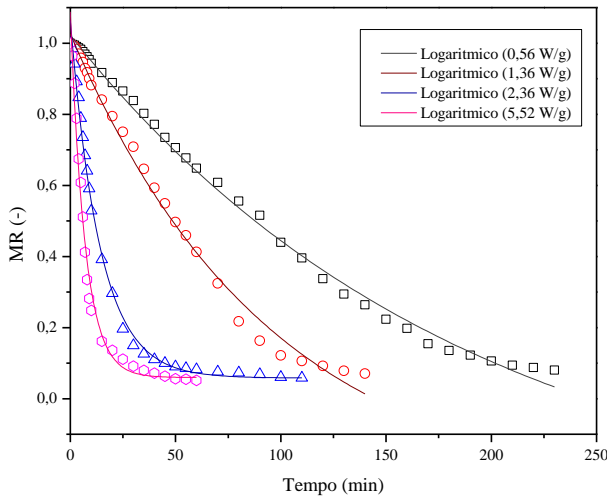


Figura 8: Curvas de cinética de secagem e equação ajustada (modelo Logarítmico).

Dentre as equações verificadas, o modelo logarítmico (Eq. 4) foi o que melhor descreveu as curvas de cinética de secagem das folhas de aroeira, com $R^2 > 0,99$, baixos valores de X^2 e valores de SQR abaixo de 10%.

Apesar dos critérios de ajuste satisfatórios, os resultados mostram que os ajustes para potências baixas não foram bons, especialmente no período final de secagem. Isso porque nestas potências o decaimento das curvas foi praticamente linear (taxa constante), e as equações de ajuste em geral se aplicam para materiais que secam a taxas decrescentes. Os dados dos ajustes podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de ajuste do modelo logarítmico (Eq. 4).

Potência (W/g)	Parâmetros	R^2	X^2	SQR
0,56	$a = 1,404$	0,997	3,75E-4	0,013
	$k = 0,005$			
	$c = -0,382$			
1,36	$a = 1,312$	0,993	7,66E-4	0,019
	$k = 0,010$			
	$c = -0,028$			
2,36	$a = 1,006$	0,996	4,60E-4	0,010
	$k = 0,071$			
	$c = 0,058$			
5,52	$a = 1,028$	0,990	1,68E-3	0,030
	$k = 0,142$			
	$c = 0,059$			

Observando-se na Tabela 3 os valores do parâmetro k para as diferentes potências, percebe-se que os valores aumentaram a medida que a potência de secagem aumentou. Segundo Soysal (2005) isso significa que com a elevação da potência do micro-ondas, a curva de secagem se torna mais íngreme, indicando uma secagem mais rápida do produto.

Resultados similares, com bom ajuste da equação semi-empírica baseada no modelo logarítmico para materiais biológicos foram encontrados por Doymaz (2006) ao avaliar a secagem em camada fina de folhas de menta (*Mentha spicata* L) em secador convectivo. Prates *et al.* (2012) analisaram a secagem das folhas de *Solanum lycocarpum* A. em secador leito fixo e observaram que a equação baseada no modelo logarítmico descreveu a secagem das folhas de *S. lycocarpum* com $R^2 > 0,99$ e baixos valores de X^2 e SQR.

Avaliação da degradação da cor

A Figura 9 apresenta dados de deterioração da cor após a secagem para as diferentes potências aplicadas. Observa-se que o parâmetro L^* não apresentou variação significativa entre as amostras, independente da potência aplicada. Em relação ao parâmetro a^* é possível verificar que para todos os ensaios de secagem os valores foram positivos, indicando perda da cor verde e aumento na intensidade da cor vermelha. Os valores de b^* foram sempre positivos, indicando que ocorreu um aumento da intensidade da cor amarela. Considerando os desvios, nenhum dos parâmetros variou de forma significativa em função da elevação da potência utilizada.

Rahimmalek e Goli (2013) afirmaram que o valor da razão a^*/b^* é considerado um parâmetro de avaliação de cor dos produtos secos, sendo que menores valores indicam melhor preservação da cor. Não foi observada variação significativa desse parâmetro com o aumento da potência. Ao comparar o valor de a^*/b^* das folhas de aroeira *in natura* ($-0,44 \pm 0,09$) com os dados de a^*/b^* mostrados na Figura 8 (valor médio igual a $0,42 \pm 0,08$) é possível verificar que ocorreu um aumento no valor deste parâmetro, indicando uma degradação de cor, independente da potência aplicada. Soysal (2005) observaram que as

amostras de folhas secas de salsa (*Petroselinum crispum* L.) em secador micro-ondas utilizando diferentes potências não apresentaram diferenças significativas entre os parâmetros de cor. Desta forma, o autor concluiu que as mudanças de coloração não dependiam das potências aplicadas na secagem, corroborando com o resultado deste estudo.

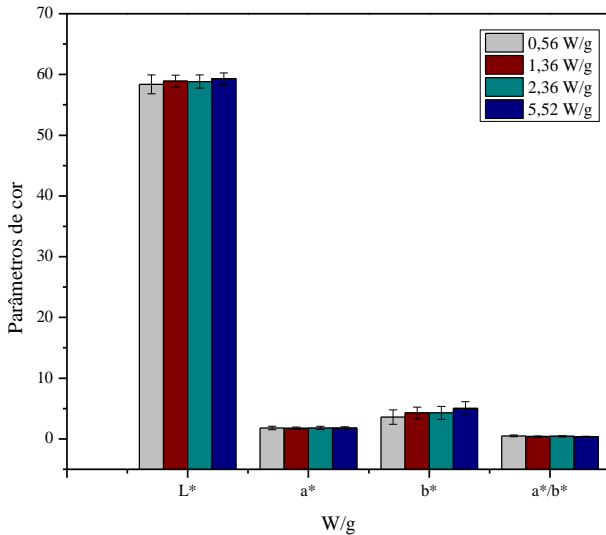


Figura 9: Parâmetros indicativos de deterioração da cor para diferentes potências de aquecimento.

Outro parâmetro que pode ser analisado para a avaliação quantitativa da deterioração cor das folhas é o ΔE^* , que indica a variação total da cor, sendo assim quanto menor este valor menor será degradação das cores das folhas secas em comparação com as folhas *in natura*. Conforme ilustrado na Figura 10 a secagem a 0,56 W/g preservou melhor a coloração em relação as potências de 1,36 W/g, 2,36 W/g e 5,52 W/g que não mostraram diferenças significativas entre si. É importante destacar que, dentre as condições testadas, a secagem a 0,56 W/g apresentou valores de temperaturas mais brandas para as folhas durante a secagem, pois a temperatura variou de 22° C a 40 °C próximo ao final da secagem. Este aspecto pode ter contribuído para uma menor variação da cor, apesar do longo tempo de secagem (230 minutos).

De acordo com Busic *et al.* (2014), as alterações na cor das folhas podem ser atribuídas as reações de decomposição de pigmentos (clorofila), que ocorrem durante o processamento térmico, à medida que a planta é aquecida, o ar é liberado e os espaços

intracelulares entram em colapso, e por consequência, são liberados pela planta compostos ácidos e clorofila dos complexos proteicos que promovem alterações nas cores das folhas.

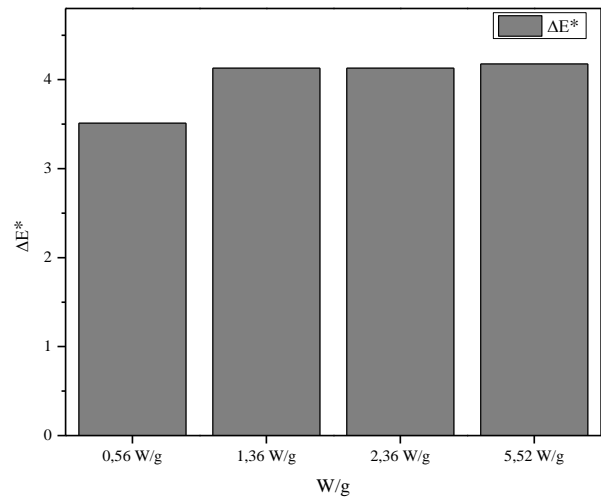


Figura 10: Valores do parâmetro ΔE^* para diferentes potências.

CONCLUSÃO

As dimensões características das folhas de aroeira apresentaram resultados esperados para as folhas medicinais com elevados valores de área superficial e área projetada, baixa esfericidade e volume pequeno. A umidade em (b.u) foi 65% e 1,82 em (b.s).

A secagem via micro-ondas mostrou-se efetiva para reduzir a umidade das folhas a valores de armazenamento visando a manutenção e qualidade do material seco. Com base nos ensaios de secagem realizados para diferentes potências foi possível identificar que na faixa de potências avaliadas, a velocidade de secagem é fortemente influenciada pela potência de irradiação. A secagem ocorreu predominantemente no período de taxa decrescente para as potências de 2,36 W/g e 5,52 W/g indicando que a remoção de umidade é controlada por mecanismos internos de transferência de massa. Para potências inferiores a 1,36 W/g, a secagem ocorreu predominantemente no período de taxa constante.

A equação baseada no modelo logarítmico mostrou-se adequada para descrever as curvas de cinética de secagem das folhas de aroeira para potências acima de 2,36 W/g e 5,52 W/g.

Segundo a avaliação do parâmetro a^*/b^* não houve diferenças significativas nos parâmetros de cor mediante ao aumento da potência de secagem. Mas, ao avaliar os valores de ΔE^* foi possível concluir que a secagem a 0,56 W/g apresentou menor deterioração comparando-se com as demais potências.

Em etapas futuras desse estudo pretende-se avaliar o efeito da secagem com micro-ondas na atividade antioxidante e teor de compostos fenólicos de extratos obtidos a partir das folhas secas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFSCar.

NOMENCLATURA

a, n, c	Parâmetros das equações (4) a (6)	[-]
k	Constante de secagem	[min ⁻¹]
MR	Adimensional de umidade	[-]
dX/dt	Taxa de secagem	[min ⁻¹]
Nn	Número de observações experimentais	[-]
NN	Número de parâmetros de ajuste	[-]
t	Tempo	[min]
T_f	Temperatura da folha	[°C]
X_i	Umidade inicial da amostra	[gH ₂ O/gss]
X_e	Umidade de equilíbrio	[gH ₂ O/gss]
y_{exp}	Valor experimental	[-]
y_{mod}	Valor predito pelo modelo	[-]
ΔE^*	Varição total da cor	[-]

REFERÊNCIAS

- AOAC (1990), Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, v. 2, 15th ed., p. 985.
- BARITAX, O.; RICHARD, H.; TOUCHE, J.; DERBESY, M. (1992), Effects of drying and species on the essential oil. Part I. Basil, *Ocimum basilicum* L, Flavour and Fragrance Journal, v. 7, n. 5, p. 367-271.
- BUSIC, A.; VOJVODIC, A.; KOMES, D.; AKKERMANS, C.; STOLK, M.; HOFLAND, G. (2014), Comparative evaluation of CO₂ drying as an alternative drying technique of basil (*Ocimum basilicum* L.) – The effect on bioactive and sensory properties, Food Research International, v. 64, p. 34-42.
- CANABARRO, N. I. (2019), Secagem convectiva de folhas visando a obtenção de compostos bioativos via extração supercrítica. PPGEQ/UFSCAR - São Carlos – SP, 175p. (tese de doutorado).
- CARVALHO, M. G.; MELO, A. G. N.; ARAGÃO, C. F. S.; RAFFIN, F. N.; MOURA, T. F. A. L (2013), *Schinus terebinthifolius* Raddi: chemical composition, biological properties and toxicity, Revista Brasileira de Plantas Mediciniais, v. 15, n. 1, p. 158-169.
- CHUA, L. Y. M.; CHUA, B. L.; FIGIEL, A.; CHONG, C. H.; WOJDYLO, A.; SZUMNY, A.; LECH, K. (2019), Characterisation of the convective hot-air drying and vacuum microwave drying of *Cassia alata*: Antioxidant activity, essential oil volatile composition and quality studies, Molecules, v. 24, n. 8, p. 1625.
- DEGÁSPARI, H. C.; WASZCZYSKYJ, N.; PRADO, M. R. M. (2005), Atividade antimicrobiana de *Schinus terebinthifolius* Raddi, Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 29, n. 3, p. 617-622.
- DOYMAZ, I. (2006), Thin-layer drying behaviour of mint leaves, Journal of Food Engineering, v. 74, p. 370-375.
- FREITAS, J. V. (2015), Desenvolvimento de um secador tipo cesto rotativo para a secagem de folhas de eucalipto (*Corymbia citriodora*). PPGEQ/UFSCar - São Carlos, São Carlos - SP, 90p. (dissertação de mestrado).
- FUMAGALLI, F. (2003), Secagem da pêra em secador a micro-ondas. PPGEQ/UFSCar

- Campus São Carlos, São Carlos – SP, 130 p. (dissertação de mestrado).
- GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A (2014), Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 56-64.
- JAMES, C.; SWAIN, M. V.; JAMES, S. J.; SWAIN, M. J. (2002), Development of methodology for assessing the heating performance of domestic microwave ovens, *International Journal of Food Science*, v. 37, p. 879-892.
- LIMA, R. D. A. B. (2013), Análise da secagem convectiva de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.). PPGEQ/UFSCar - Campus São Carlos, São Carlos - SP, 145 p. (tese de doutorado).
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. (1996), The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, v. 29, p. 75-97.
- MONTEIRO, R. L.; LINK, J. V.; TRIBUZI, G.; CARCIOFI, B. A.; LAURINDO, J. B. (2018), Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, v. 232, p. 1-10.
- OLIVEIRA, M. E. C.; FRANCA, A. S (2002), Microwave heating of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v. 53, n. 4, p. 347-359.
- PINHO, L.; SOUZA, S. N. P.; SOBRINHO, M. E.; ALMEIDA, C. A.; MARTINS, R. E (2012), Atividade antimicrobiana de extratos hidroalcoolicos das folhas de alecrim-pimenta, aroeira, barbatimão, erva baleeira e do farelo da casca de pequi, *Ciência Rural*, v. 42, n. 2, p. 326-331.
- PRATES, M. F. O.; REIS, R. D.; DEVILLA, I. A.; FARIA, R. Q.; LIMA JUNIRO, A. F. (2012), Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (Fruta-de-lobo), *Revista brasileira de plantas medicinais*, v. 14, p. 514-521.
- RAHIMMALEK, M.; GOLI, H. S. A (2013), Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield composition and color characteristics of *Thymus daenensis* subsp. Celak leaves, *Industrial Crops and Products*, v. 42, n. 2013, p. 613-619.
- ROSA, J. G. (2010), Secagem de cenoura (*Dacus carota* L.) em micro-ondas. PPGEQ/UFSCAR – São Carlos – SP, 96p. (dissertação de mestrado).
- ROSANOVA, A. H. (2017), Desenvolvimento de um secador de tambor rotativo para a secagem de folhas condimentares e fitoterápicas. PPGEQ/UFSCar - São Carlos, São Carlos - SP, 160 p. (tese de doutorado).
- SARIMESELI, A. (2001), Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 1, p. 1449-1453.
- SCHIFFMANN, R. F. (1995), Microwave and dielectric drying. In: *Handbook of Industrial Drying*. 2ª Edição. New York: Ed. Arun S. Mujumdar, 1995, 345-372p.
- SILVA, R. H (2021), Secagem convectiva da folha de aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) em tambor rotativo com parede perfurada: influência das condições operacionais na preservação da cor e compostos bioativos. PPGEQ/UFSCar - São Carlos, São Carlos - SP, 120 p. (dissertação de mestrado).
- SOYSAL, Y. (2005), Mathematical modeling and evaluation of drying kinetics of mint (*Mentha picata* L.). *Journal of Applied Sciences*, v. 7, n. 5, p. 1266-1274.
- TORKI-HARCHEGANI, M.; GHASEMI PIRBALOUTI, A.; GHANBARIAN, D (2018), Influence of microwave power on composition kinetics composition chemical and antioxidant capacity of peppermint leaves, *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, v. 21, n. 2, p. 430-439.
- XU, F.; CHEN, Z.; HUANG, M.; LI, C.; ZHOU, W. (2017), Effect of intermittent microwave drying on biophysical characteristics of rice, *Journal of Food Process*, v. 40, n. 6, p.1-13.
- ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A. S.; WANG, S. (2006), Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables, *Trends in Food Science and Technology*, v. 17, n. 10, p. 524-534.