

ESTUDO DA AVALIAÇÃO DE SECAGEM DA FOLHA DA CHANANA (*TURNERA ULMIFOLIA L.*)

STUDY OF THE CHANANA LEAF DRYING ASSESSMENT (*TURNERA ULMIFOLIA L.*)

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE SECADO DE HOJA DE CHANANA (*TURNERA ULMIFOLIA L.*)

Emanuelle Santos de Menezes¹

Ivailson Lobo Santos²

Isabelle Santos de Menezes³

Dennys Correia da Silva⁴

Resumo: A chanana é uma planta medicinal estudada no Brasil como tratamento para enfermidades. Em espécies medicinais, não é possível as indústrias utilizarem plantas frescas, por isso o processo de secagem é utilizado. Este trabalho teve como objetivo avaliar e modelar as curvas de cinética de secagem das folhas da chanana para as faixas de temperatura de 40, 50 e 60°C. As curvas foram obtidas através de determinados modelos semi-empíricos. O modelo de Peleg se ajustou melhor aos dados experimentais, com valor médio de coeficiente de determinação (R^2) de 0,98 e erro relativo médio de ajuste (MRE) de 0,057.

Palavras-chave: Chanana. Cinética de Secagem. *Turnera Ulmifolia L.* Modelagem Matemática.

Abstract: Chanana is a medicinal plant studied in Brail as a treatment for diseases. In medicinl species, it is not possible for industries to use fresh plants, so the drying process is used. This work aimed to evaluate and model the curing kinetics curves of chanana leaves for the temperature ranges of 40, 50 and 60°C. The curves were obtained using certain semi-empirical models. The Peleg model fitted better to the experimental data, with na average value of determination coefficient (R^2) of 0,98 and na average relative adjustment error (MRE) of 0,057.

Keywords: Chanana. Drying Kinetics. *Turnera Ulmifolia L.* Mathematical Modeling.

Resumen: Chanana es una planta medicinal estudiada en Brasil como tratamiento para enfermidades. En las especies medicinales, no es posible que las industrias utilicen plantas frescas, por lo que se utiliza el proceso de secado. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar y modelar las curvas cinéticas de curado de las hojas de chanana para los rangos de temperatura de 40, 50 y 60°C. Las curvas se obtuvieron utilizando ciertos modelos semi-empíricos. El modelo de Peleg se ajustó mejor a los datos experimentales, con un valor promedio del coeficiente de determinación (R^2) de 0.98 y un error de ajuste relativo promedio (MRE) de 0.057.

Palabras-clave: Chanana. Cinética de Secado. *Turnera Ulmifolia L.* Modelado Matemático.

Submetido 08/03/2020

Aceito 05/11/2021

Publicado 29/12/2021

¹Graduanda em Engenharia Química na Universidade Federal do Maranhão. E-mail: manumenezes98@hotmail.com. Orcid: 0000-0003-4093-0766.

²Graduando em Engenharia Química na Universidade Federal do Maranhão. E-mail: ivailsonlobo@gmail.com. Orcid: 0000-0003-4603-6351.

³Graduanda em Engenharia Química na Universidade Federal do Maranhão. E-mail: isamenezes88@gmail.com. Orcid: 0000-0003-3157-945X.

⁴Doutorando em Engenharia Química na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: dennys.silva19@gmail.com. Orcid: 0000-0002-6280-7606.

Introdução

A chanana (*Turnera ulmifolia L.*) é uma planta tradicionalmente utilizada como erva medicinal no combate à bronquite, leucorreia, dores em geral, febre, má digestão, reumatismo e hemorragias (Fortes; Okos, 1980), além de servir como estudo no tratamento de pessoas portadoras de HIV/AIDS (Almeida; Alves; Amaral, 2012). Atualmente, a tintura da chanana é utilizada em pacientes portadores de câncer, após sessões de radioterapia e quimioterapia no intuito de aliviar as sensações de mal-estar e vômito (Goneli et al., 2014).

A espécie vegetal chanana (*Turnera ulmifolia L.*) é também conhecida popularmente no Brasil como albina ou flor-do-guarujá, fazendo parte da família Turneraceae. Esse tipo de espécie apresenta raiz axial, caule sublenhoso, folhas simples pecioladas e pubescentes, flores com corola que podem possuir pétalas brancas, amarelas ou alaranjadas, manchadas na base ou simplesmente limpas. É considerada uma planta com potencial ornamental, por possuir flores com cores vistosas e como planta invasora, pois ocorre espontaneamente em terrenos baldios, em beira de estradas e praças (Arbo, 2000; Arbo, 2005; González; Arbo, 2005).

A família Turneraceae D.C. pode ser encontrada em regiões tropicais e subtropicais pertencentes aos continentes africano e americano, e apresenta 10 gêneros de aproximadamente 190 espécies. Além disso, possui uma maior diversidade de espécies no continente americano (ARBO, 2004) e no Brasil, sendo que podem ser encontrados dois gêneros e aproximadamente 80 espécies (Christensen; Kaufmann, 1974).

O processo de secagem consiste em um fenômeno simultâneo de transferência de calor e de massa, onde há a remoção de umidade, geralmente água, de um sistema sólido ou semissólido, muitas vezes causada por convecção forçada de ar aquecido (Isquierdo et al., 2013; Teixeira; Melo, 2006). A conservação pela secagem se baseia na redução da quantidade de água do material e isso dificulta a atividade metabólica e as mudanças químicas e físicas de certos microrganismos e enzimas durante o armazenamento. Com a redução da água disponível, conseqüentemente serão reduzidas a atividade de água e a velocidade das reações químicas no produto (Kumar; Taneja; Sharma, 2005).

Na literatura encontra-se vários métodos propostos para descrever matematicamente o processo de secagem. São eles: os teóricos, os semi teóricos e os empíricos (Júnior; Corrêa, 1999). O método empírico é realizado usando dados experimentais que podem ser determinados em laboratório. Esse método geralmente se baseia nas condições externas, não fornecendo

informações sobre o transporte de energia e massa no interior do produto (Santos et al., 2010). O método teórico geralmente considera as condições externas e os mecanismos internos de transferência de energia e massa. Já o semi teórico se baseia na Lei de Newton para resfriamento aplicada à transferência de massa (Brooker; Baker-Arkema; hall, 1992).

A grande procura por plantas medicinais ocorre em diversos países devido à preferência dos consumidores em utilizarem produtos farmacêuticos ou alimentícios de origem natural (Martinazzo et al., 2007). O conteúdo de umidade final e a energia requerida para a secagem são informações de grande importância para o processo de modelagem e modificação de equipamentos a nível industrial (Mulet et al., 2002; Silva, 2017). Em espécies medicinais, as indústrias de fitoterápicos não podem utilizar plantas frescas nas quantidades exigidas, por isso o processo de secagem é utilizado, por ser uma operação unitária que faz a preparação para o armazenamento (Lorenzi; Matos, 2002).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de temperaturas diferentes na cinética de secagem das folhas da chanana (*Turnera ulmifolia L.*) e analisar os dados obtidos em laboratório com alguns modelos matemáticos sugeridos pela literatura.

Revisão Bibliográfica

Chanana

A espécie vegetal chanana (*Turnera ulmifolia L.*) é também conhecida popularmente no Brasil como albina ou flor-do-guarujá. Faz parte da família Turneraceae, que possui aproximadamente 190 espécies. Esse tipo de espécie apresenta raiz axial, caule sublenhoso, folhas simples pecioladas e pubescentes, flores com corola que podem possuir pétalas brancas, amarelas ou alaranjadas, manchadas na base ou simplesmente limpas. É considerada uma planta com potencial ornamental, por possuir flores com cores vistosas e como planta invasora, pois ocorre espontaneamente em terrenos baldios, em beira de estradas e praças. (Gonzalez; Arbo, 2005; Arbo, 2000).

Importância

Produtos naturais biologicamente ativos são cada vez mais utilizados na descoberta de novos fármacos, para as mais diversas doenças (Argenta, 2011). Na medicina popular, a

chanana é bastante utilizada com diversas finalidades, como tratamento para hemorragias, febre, asma, má digestão, diarreias, dores e bronquite (Correa, 1984; Hosanami, 1993). Atualmente, a tintura da chanana é utilizada em pacientes portadores de câncer, após sessões de radioterapia e quimioterapia no intuito de aliviar as sensações de mal-estar e vômito (Teixeira; Melo, 2006).

Localização

A família Turneraceae D.C. pode ser encontrada em regiões tropicais e subtropicais pertencentes aos continentes africano e americano e apresenta 10 gêneros e com aproximadamente 190 espécies. Além disso, possui uma maior diversidade de espécies no continente americano (Arbo 2004) e no Brasil, sendo que podem ser encontrados dois gêneros e aproximadamente 80 espécies (Kumar et al., 2005).

A espécie *Turnera ulmifolia* L., conhecida popularmente por chanana, albina ou flor-do-guarujá, é uma erva anual que se encontra distribuída desde a América até a região sul do Brasil, essa erva nativa da América tropical. Ocorre espontaneamente em terrenos baldios, praças e ruas. (Urban, 1883; Arbo, 2005).

Secagem

Existem dois métodos de secagem: a natural e a artificial. O tipo de secagem natural ocorre através da exposição do produto ao sol posicionado em piso adequado, proporcionando a retenção de calor e fazendo com que o material em análise perca água por aquecimento do piso e da superfície que estiver próxima ou ainda em galpões na presença de ventiladores e aspiradores. Este método é bastante econômico, pois não emprega gasto de energia para uso de equipamentos sofisticados de secagem, mas é bastante lento e necessita de grandes áreas de exposição dos alimentos (Romero et. al., 1997).

Na secagem artificial, ou também chamado de desidratação, o calor é produzido artificialmente em estufas ou galpões (armazéns climatizados) preparados para este objetivo, pois tem um maior controle de temperatura, umidade e corrente do ar. É um método mais rápido, pois não exige grandes áreas de secagem, mas exige capital e mão de obra qualificada. A desidratação é feita por meio de vapor superaquecido, sistema a vácuo, uso de gases inertes ou pela aplicação direta de calor (Romero et. al., 1997).

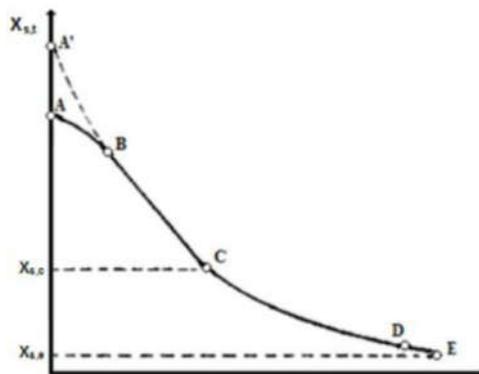
Na secagem, ocorre transferência de calor e de massa, ou seja, enquanto o calor se transmite da área externa para o interior, a massa de umidade se desloca do interior para a superfície do material, posteriormente tornando-se vapor e sendo transferido para o ar seco (Treybal, 1980). Segundo Foust et al. (1982), o processo de secagem também consiste na remoção de um líquido retido em um material sólido. A secagem possibilita, também, considerável economia no transporte, no manuseio e na estocagem do produto (Romero-Peña; Kieckbusch, 2003).

Curva de Secagem

Durante a secagem de um sólido em contato com gás, a uma dada umidade e determinada temperatura, há um comportamento padrão, elabora-se um gráfico de umidade em função do tempo. Para muitos materiais o processo de secagem possui diferentes etapas: no início tem-se um período de taxa de secagem constante, até chegar a um teor de umidade crítico, sendo que depois desse ponto começa o período de secagem decrescente (Geankoplis, 1986; Camargo, 2005).

O processo de secagem está associado aos fenômenos de transferência de calor, massa, às mudanças do conteúdo médio de umidade do material e da temperatura média com o tempo, sendo afetada por condições ambientais do meio (pressão total, temperatura, umidade relativa e velocidade do meio de secagem) e pela estrutura física e química do material a ser desidratado. Na secagem de um sólido úmido, mediante um gás em condições ambientais fixas, manifesta-se o tipo de comportamento apresentado na Figura 1 (Foust et al., 1982; Strumillo; Kudra, 1986).

Figura 1 - Curva típica de secagem convectiva.



Fonte: Strumillo e Kudra (1986).

Modelos Empíricos de Secagem

O estudo da cinética de secagem é de grande importância para a modelagem matemática e para elaboração do projeto de secadores. É através deste estudo que se estabelecem as equações da umidade em função do tempo de secagem para diferentes períodos e taxas de secagem. A cinética possibilita também a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas (Ferreira, 2004).

A modelagem empírica consiste na abordagem matemática do processo tendo como base somente os dados experimentais, sendo que os parâmetros não possuem significado físico, diferentemente da modelagem semi-empírica, onde existe uma “harmonia” entre a teoria e a facilidade em seu uso. Os modelos semi-empíricos, em geral, são simplificações derivadas da lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa (Brooker; Bakker-Arkema; Hall, 1982). a seguir, serão citados alguns modelos com seus seguintes fatos históricos e importâncias.

- Modelo de Lewis

Em alguns casos a teoria difusional não é adequada para ajustar o comportamento da taxa de secagem em virtude de interferências não efeito de resistência interna do material. Nesses casos pode-se utilizar alguns modelos semi-teóricos, como o modelo de Lewis. Este modelo faz analogia com a lei de Newton do resfriamento, sugerindo um modelo semi-empírico

que considera que a resistência à transferência de massa ocorre numa camada delgada na superfície dos sólidos (Lewis, 1921).

- Modelo de Page

Uma modificação no modelo de Lewis foi realizada por Page (1949), desenvolvendo um modelo mais preciso para a descrição da secagem em camada delgada. A modificação envolveu a adição de um termo exponencial (n) na variável tempo (t).

O modelo de Page (1949) é uma modificação do modelo Lewis que envolve uma adição de um termo exponencial (n) no variável tempo. Este modelo vem sendo bastante utilizado por vários pesquisadores para estimativa das curvas de secagem de vários produtos agrícolas (Diamante e Munro, 1993).

- Modelo de Henderson e Pabis

O modelo de Henderson e Pabis é uma equação similar ao modelo de Lewis, sendo apenas adicionado o parâmetro ajustável a_1 , antes do termo exponencial. Com esta equação pode-se obter a difusividade efetiva (D) a partir da constante de secagem (K) (Henderson e Pabis, 1961).

Modelo Difusional

O modelo da difusão tem sido amplamente aplicado na área de secagem, mesmo existindo algumas hipóteses a serem consideradas para sua aplicação, sendo elas: encolhimento desprezado, não existência do efeito de capilaridade, equilíbrio térmico instantâneo com o ar e os efeitos de transferência de energia e massa de um corpo para outro admitindo como desprezíveis. Por conta da umidade interna, a migração do líquido é um fator limitante da secagem. Desse modo, as duas maneiras mais aplicadas na tentativa de dimensionar essa migração são através da teoria difusional de líquidos ou de equações empíricas.

A taxa de secagem é verificada utilizando-se a teoria difusional, dada pela lei de Fick Equação (1), que expressa o fluxo de massa por unidade de área proporcional ao gradiente de concentração de água. A difusividade é a facilidade com que a água é removida do material e varia conforme a temperatura e velocidade do ar de secagem (Oliveira et al., 2006).

$$\frac{\partial x}{\partial t} (D \cdot \nabla x) \quad (7)$$

onde: X é a variação de umidade pelo tempo; D é a difusividade efetiva da massa e t é o tempo.

Materiais e Métodos

Matéria Prima

Este estudo foi realizado no Laboratório de Engenharia de Produtos e Processos em Biorrecursos, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa do curso de Engenharia Química (LEPEQ), localizado na Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Para realização dos experimentos foram extraídas manualmente folhas da chanana em canteiros da Universidade Federal do Maranhão e para higienização da folha fez-se cuidadosamente o uso do papel toalha.

Equipamentos

Foram utilizados os seguintes equipamentos: Balança analítica (Shimadzu, BL320H, Brasil); desidratador de alimentos (Pardal, Brasil); estufa de secagem e esterilização (SL-100/A, Solab); paquímetro analógico (Vis, Polônia.); bandeja de alumínio; placas de petri de alumínio.

Procedimentos Experimental

No processo de secagem utilizou-se um desidratador de alimentos (Pardal, Brasil) nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. Duas folhas com comprimentos e larguras diferentes e espessuras iguais foram expostas a cada temperatura de secagem conforme a Tabela 1. As pesagens foram controladas em um intervalo de tempo de 5 em 5 min, até atingirem suas massas de equilíbrio, onde houve mais nenhuma variação significativa de massa.

Tabela 1: Dados de análise para cada folha utilizada na cinética de secagem.

T	Comprimento	Largura	Espessura	Massa de Amostra
(°C)	(cm)	(cm)	(cm)	inicial (g)

40	5,80	3,50	0,04	0,20
	5,50	3,90	0,04	0,24
50	6,00	3,40	0,04	0,18
	6,90	3,60	0,04	0,23
60	6,10	3,00	0,04	0,18
	7,00	3,30	0,04	0,24

Fonte: Próprio Autor (2018).

Modelagem Matemática

Nove modelos matemáticos foram utilizados para descrever o comportamento dos dados da cinética de secagem: Weibull Equação (2), Peleg Equação (3), Henderson-Pabis Equação (4), Lewis Equação (5), Page Equação (6), Logarítmico Equação (7), Wang e Sing Equação (8), Midilli et al. Equação (9), Aproximação da Difusão Equação (10).

$$RU = \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right) \quad (2)$$

$$X = X_0 - \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (3)$$

$$RU = a \cdot \exp(-kt) \quad (4)$$

$$RU = \exp(-kt) \quad (5)$$

$$RU = \exp(-kt^n) \quad (6)$$

$$RU = kt^2 + nt + 1 \quad (7)$$

$$RU = a \cdot \exp(-kt) + c \quad (8)$$

$$RU = a \cdot \exp(-kt^n) + bt \quad (9)$$

$$RU = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt) \quad (10)$$

onde a razão de umidade (RU), para as diferentes temperaturas, corresponde a Equação (11).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (11)$$

Em que

X : teor de água inicial do produto;

X_0 : teor de água inicial do produto;

X_e : teor de água no equilíbrio;

t : tempo de secagem;

k : Coeficiente de secagem;

a, b, c, n : Constantes dos modelos.

Calculou-se também a umidade do produto na base seca a cada instante através da Equação (12).

$$X_e = \frac{Me - M_s}{M_s} \quad (12)$$

onde Me é a massa de equilíbrio (g) a cada intervalo; M_s é a massa seca do produto (g) obtida em estufa a 105°C, por 24 horas.

O grau de ajuste dos modelos aos dados experimentais foi avaliado em função da magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e do erro relativo médio de ajuste (MRE). Os valores considerados favoráveis para o R^2 são próximos de um e para o MRE são valores próximos de zero Equações (13) e (14).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_0)^2}{GLR} \quad (13)$$

$$MRE = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (14)$$

onde:

Y : valor observado experimentalmente

Y_0 : valor calculado pelo modelo

GLR : graus de liberdade do modelo

N : número de observações experimentais

Para calcular a massa seca do produto, o qual corresponde a massa com o mínimo de teor de água possível, foi utilizada uma estufa de secagem e esterilização (Solab, SL-100/A, Brasil). Foram coletadas 3 folhas com comprimentos em torno de 6 cm e em seguida postas sob aquecimento a $105 \pm 1^\circ\text{C}$ por 24h. Com isso, as folhas foram pesadas e das massas resultantes encontrou-se uma média de $0,064\text{g} \pm 0,02$. Para determinar o coeficiente de difusão efetivo para a secagem das folhas da chanana, foi utilizada a Equação (15), baseado no modelo matemático da difusão líquida com a solução analítica para a placa plana infinita.

$$X = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 D \frac{t}{4L^2}\right] \quad (15)$$

Modelagem Matemática

Os ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem foram feitos utilizando análise de regressão não linear, pelo método *Simplex* e *Quasi-Newton*, através do programa computacional *Excel 2016*. Os parâmetros foram otimizados no solver e para os resultados foram feitos os gráficos no software *OriginPro8*.

Resultados e Discussão

Na Tabela 2 são apresentados os ajustes dos modelos por meio da regressão não linear aos dados experimentais de secagem de folhas da *Turnera ulmifolia L.*, de acordo com as diferentes temperaturas de secagem estudadas.

De todos os modelos avaliados, o de Peleg foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, pois o valor médio de coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,98 e o erro relativo médio de ajuste (MRE) foi de 0,057, sendo desta forma o modelo que mais se aproximou do que era previsto, visto que, os valores do erro relativo, por mais que tenham sido valores relativamente altos, foram os que mais se aproximaram de zero.

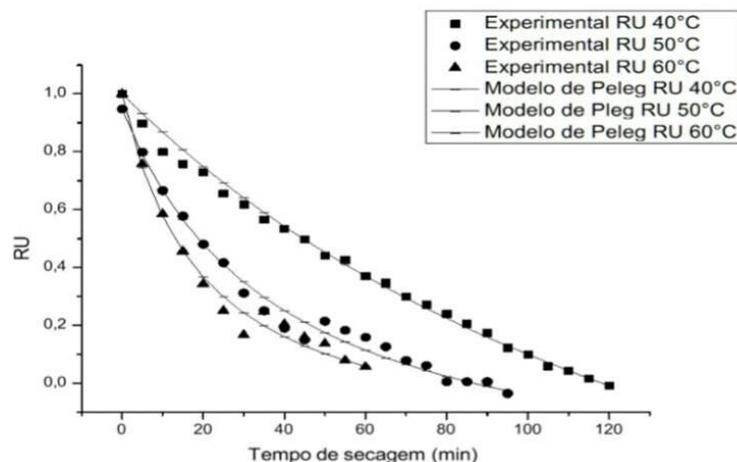
Tabela 2: Valores do coeficiente de determinação (R^2) e do erro relativo (MRE), calculados para verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos valores experimentais da secagem de folhas da *Turnera ulmifolia L.*, obtidos nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C.

Modelos Matemáticos	MRE (%)			R ²		
	40°C	50°C	60°C	40°C	50°C	60°C
Weibull	7,000	9,768	14,371	0,971	0,974	0,957
Peleg	1,674	6,724	8,554	0,997	0,988	0,984
Henderson-Pabis	6,932	8,130	11,427	0,967	0,971	0,949
Lewis	7,030	9,768	14,371	0,971	0,974	0,957
Page	5,481	7,018	9,268	0,980	0,986	0,982
Logarítmico	1,579	37,249	0,483	0,997	0,312	0,483
Wang e Sing	3,356	12,856	18,721	0,990	0,970	0,954
Midilli et al.	5,653	7,067	9,003	0,971	0,986	0,985
Aproximação da Difusão	1,719	7,816	10,009	0,997	0,986	0,310

Fonte: Próprio Autor (2018).

Na Figura 2, encontram-se os dados experimentais e os calculados para a razão de umidade (RU). Assim, é possível obter o teor de água das folhas da chanana de acordo com o modelo de Peleg.

Figura 2 - Razão de umidade da folha da chanana para o modelo de Peleg.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Com as equações dos modelos matemáticos e seus respectivos parâmetros, encontrados na Tabela 3, e suas equações e valores de ajustes encontrados na Tabela 2, foi possível perceber que alguns modelos como o de Weibull e de Page também tiveram valores satisfatórios de ajuste, pois seus valores médios de coeficiente de determinação (R^2) foram de 0,97 e 0,98, respectivamente. Todavia, alguns modelos não tiveram um bom ajuste. Um exemplo disso foi o modelo Logarítmico, que obteve um valor médio para o coeficiente de determinação (R^2) de 0,60 e erro relativo médio de ajuste (MRE) de 0,13.

Tabela 3: Parâmetros obtidos dos modelos ajustados aos dados de secagem de folhas da *Turnera ulmifolia L.*, para diversas temperaturas do ar.

Modelos Matemáticos	Parâmetros	Temperatura (°C)		
		40	50	60
Weibull	B	54,030	48,530	29,644
Peleg	k_1	44,821	14,650	7,373
	k_2	0,248	0,378	0,379

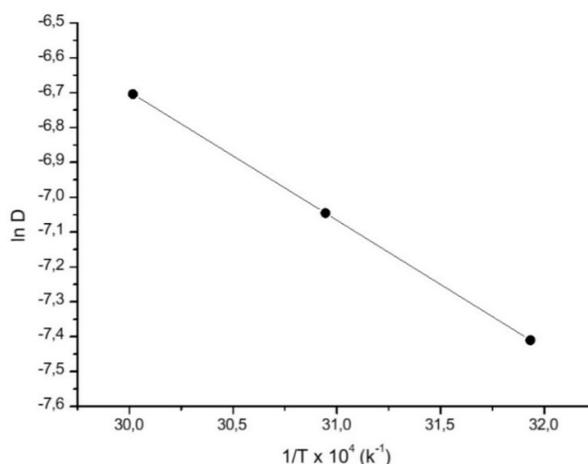
Henderson-Pabis	<i>A</i>	1,059	0,903	0,842
	<i>K</i>	0,019	0,019	0,031
Lewis	<i>K</i>	0,019	0,021	0,034
	<i>K</i>	0,006	0,043	0,096
Page	<i>N</i>	1,260	0,830	0,740
	<i>A</i>	1,070	0,763	0,787
Logarítmico	<i>K</i>	0,008	7,370	2,440
	<i>C</i>	-0,100	0,240	0,210
Wang e Sing	<i>A</i>	-0,010	-0,020	-0,037
	<i>B</i>	0,000	0,000	0,000
Midilli et al.	<i>A</i>	0,799	1,011	1,027
	<i>K</i>	-0,082	0,042	-0,153
	<i>N</i>	0,700	0,700	1,060
	<i>B</i>	-0,040	-0,010	-0,230
Aproximação da Difusão	<i>A</i>	-0,203	0,070	0,002
	<i>K</i>	-0,005	-0,004	-0,050
	<i>B</i>	2,380	7,320	1,080

Fonte: Próprio Autor (2018).

Com o aumento na temperatura do ar de secagem, a viscosidade, que representa a resistência do fluido ao escoamento da água diminuiu, resultando em alterações na difusão da água nos capilares das folhas, favorecendo a movimentação do fluido (GONELI et al., 2014). A Figura 3 mostra os valores de difusividade efetiva (D) apresentados na forma de “ $\ln D$ ”

descritos em função do recíproco da temperatura absoluta ($1/t$). A reta obtida indica a uniformidade de variação da difusividade com a temperatura.

Figura 3 - Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura (40, 50 e 60 °C) do ar de secagem de folhas de chanana.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Os valores da difusividade efetiva (D) obtidos para os diferentes tratamentos estão apresentados na Tabela 4, como também os resumos do ajuste dos modelos por meio de regressão não linear aos dados experimentais de secagem, considerando-se as diferentes temperaturas do ar, com os parâmetros ajustados, o erro relativo médio de ajuste (MRE) e o coeficiente de determinação (R^2) de cada modelo. Os valores de difusividade variaram de $9,8 \times 10^{-6}$ a $1,1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$, mantendo-se o mesmo de 50 a 60 °C.

Tabela 4: Valores da difusividade efetiva (d) obtidos para a folha da chanana em diferentes temperaturas de secagem.

Temperatura	Difusividade	MRE	R^2
(°C)	(mm^2s^{-1})	(%)	

40	$9,8 \times 10^{-6}$	9,865	0,962
50	$1,1 \times 10^{-6}$	7,867	0,98
60	$1,1 \times 10^{-5}$	0,100	0,900

Fonte: Próprio Autor (2018).

Conclusão

Com os resultados da cinética de secagem obtidos para a folha da chanana (*Turnera ulmifolia* L.) foi possível avaliar que o modelo matemático que mais se ajustou aos dados experimentais foi o de Peleg, com valor médio de coeficiente de determinação (R^2) de 0,98, erro relativo médio de ajuste (MRE) de 0,057 e com os menores índices de desvios.

Alguns modelos matemáticos não se ajustaram adequadamente à cinética de secagem da folha da chanana, pois seus erros relativos e coeficientes de determinações tiveram valores divergentes do esperado. Exemplo disso, foi o modelo Logarítmico que obteve os seguintes valores de R^2 : 0,997, 0,312 e 0,483, para as temperaturas de 40, 50,60°C, respectivamente. Os valores de MRE também não se adequaram corretamente pois a variação nas temperaturas estudadas ocorreu de forma desigual, com os seguintes valores: 1,579, 37,249 e 0,483.

Os valores obtidos para a difusividade relativa aumentaram com a elevação da temperatura, variando de $9,8 \times 10^{-6}$ a $1,1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$, mantendo-se o mesmo de 50 a 60°C.

Com base nos resultados e na discussão realizada neste trabalho, sugere-se uma perspectiva futura de pesquisa, um exemplo, é o procedimento do planejamento experimental do processo de secagem da folha da chanana.

Referências

ALMEIDA, F. M.; ALVES, M. T. S. S. B.; AMARAL, F. M. M. **Uso de plantas com finalidade medicinal por pessoas vivendo com HIV/ AIDS em terapia antirretroviral.** Saúde e Sociedade, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 424-434, 2012.

ARBO, M.M. **Estudios sistemáticos en Turnera (Turneraceae). II Series Annulares, Capitatae, Microphyllae y Papilliferae.** Bonplandia, v. 10, p. 1-82, 2000.

ARBO, M. M. **Turneraceae (Turnera Family)**. In: N. Smith et al. (Eds.) *Flowering Plants of Neotropics*. The New York Botanical Garden. Princkton University Press, 2004.

ARBO, M.M. **Estudios sistemáticos em Turnera (Turneraceae)**. III Series Anomalae y Turnera. *Bonplandia*, v. 14, p. 115-318, 2005.

ARGENTA, S. C. **Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI Vivências**. v.7, n.12, p.51-60, Maio. 2011.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI book, p. 450, 1982.

CAMARGO, G. A. **Novas Tecnologias e Pré-tratamento: Tomate Seco Embalado a Vácuo**. 2005. 175 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. **Storage of cereal grain and their products**. St. Paul, MN: American Association of Cereals Chemists, p. 158-192, 1974.

CORREA, M. P. **Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 687 p, 1984.

FERREIRA, M. M. P. **Desenvolvimento caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004. 235f. Dissertação Mestrado.

FORTES, M.; OKOS, M.R. **Drying theories; their bases and limitations as applied to foods and grains**. In: Mujundar, A.S., (ed.). *Advances in drying*. New York: Science Press, p.153-162, 1980.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Traduzida por Horacio Macedo, LTC, 1982.

GEANKOPLIS, C. J. **Processos de transporte y operaciones unitárias**. México, Cia Editorial Continental, 1986.

GONELI, A. L. D. et al. **Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

GONZÁLEZ, A. M.; ARBO, M. M. **Anatomy of some species of Turneraceae**. *Acta Botánica Venezuélica*, Sargento Cabral, v. 28, n. 2, p. 369-394, 2005.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. **Grain drying theory**. I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agriculture Engineering Research*, v.6, n.3 p.169-174, 1961.

HOSAMANI, K.M. **Fatty acids in seed oil from Turnera ulmifolia**. *Phytochemistry*, 35: 1363-1365, 1993.

ISQUIERDO, E. P et al. **Drying kinetics and quality of natural coffee**. *Transactions of the ASABE*, v. 56, p. 1003–1010, 2013.

- JÚNIOR, P. C. A; CORRÊA, P. C. **Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 3, p. 349-353, 1999.
- KUMAR, S. et al. **The Genus Turnera.:** The new update. Pharmaceutical Biology, v. 43, n. 5, p. 393-391, 2005.
- LEWIS, L.W. **The rate of drying of solid materials.** Industrial Engineering Chemistry. v.13, n. 1, p. 427, 1921.
- LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: Nativas e exóticas.** Nova Odessa: Instituto Plantarum, p. 512, 2002.
- MARTINAZZO et al. **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.
- MULET, A. et al. **Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (Morchela esculenta).** Journal of Food Engineering, v. 53, p. 75-81, 2002.
- Oliveira, R. A.G. et al. **Estudo da interferência de óleos essenciais sobre a atividade de alguns antibióticos usados na clínica.** Rev Bras Farmacop 16: 77-82. 2006.
- ROMERO, J. T.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F.; TELIS, V. R. N.; MENEGALLI, F. C. **Secagem de produtos alimentícios.** São José do Rio Preto: Unesp. p. 58., 1997.
- ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. **Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate.** Brazilian Journal of Food Technology, Campinas, v. 6, n. 1, p. 69-76, 2003.
- SANTOS, N. C.; DIAS, C. N.; MORAES, D. F. C.; VILANOVA, C. M.; GONÇALVES, J. R. S.; SOUZA, N. S. E ROSA, I. G. **Toxicidade e avaliação de atividade moluscicida de folhas de Turnera ulmifolia L.** Revista Brasileira de Biociências, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 324-329, 2010.
- SILVA, D. C. et al. **Estudo da modelagem de cinética de secagem da polpa de cupuaçu na produção de biopolímeros.** Revista Brasileira de Iniciação Científica, Itapetininga, v. 4, n. 3, 2017.
- TEIXEIRA, S.T.; MELO, J.I.M. **Plantas medicinais utilizadas no município de Jupi,** Iheringia. Ser. Bot., Pernambuco, v. 61, n. 1-2, 2006.
- TREYBAL, R. E. **Mass – transfer operations.** 3 ed. Singapore McGraw-Hill 1980. (Chemical Engineering Series).
- URBAN, I. **Monographie der familie der Turneraceen.** Jahrb Königl Bot Gart Berlin 2: 1-155.
- STRUMIŁŁO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design.** Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 448p, 1986.