

**Modelagem matemática da cinética de secagem e equilíbrio higroscópico de folhas de  
*Cymbopogon flexuosus***

**Mathematical modeling of drying kinetics and hygroscopic balance of *Cymbopogon  
flexuosus* leaves**

**Modelado matemático de la cinética de secado y el equilibrio higroscópico de las hojas  
de *Cymbopogon flexuosus***

Recebido: 08/04/2020 | Revisado: 20/04/2020 | Aceito: 23/04/2020 | Publicado: 25/04/2020

**Filipe da Silva de Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3463-9630>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: [filipe.oliveira@estudante.ufla.br](mailto:filipe.oliveira@estudante.ufla.br)

**Ednilton Tavares de Andrade**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8448-8781>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: [ednilton@ufla.br](mailto:ednilton@ufla.br)

**Paula de Almeida Rios**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2836-918X>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: [paulariosagricola@gmail.com](mailto:paulariosagricola@gmail.com)

**Kátia Soares Moreira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8724-3133>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: [katiasoaresmoreira@hotmail.com](mailto:katiasoaresmoreira@hotmail.com)

**Luís Gustavo Amaral Sálvio**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9259-9780>

Universidade Federal de Lavras, Brasil

E-mail: [luis.salvio@estudante.ufla.br](mailto:luis.salvio@estudante.ufla.br)

**Resumo**

O gênero *Cymbopogon* é amplamente estudado por suas características medicinais, as quais são reconhecidas e utilizadas em todo o mundo. No entanto há a necessidade de se estudar a

cinética de secagem, equilíbrio higroscópico e a alteração de cor das folhas de *Cymbopogon flexuosus* mediante a variação da temperatura de secagem. O objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de secagem de folhas de capim-indiano, ajustar um modelo dentre os existentes na literatura que melhor representa o comportamento da isoterma de sorção, como também analisar o efeito do processo de secagem na coloração das folhas. As folhas de capim-indiano foram cortadas em comprimento de 0,2 m e submetidas às temperaturas de ar de secagem de 35, 45, 55 e 70 °C em secador mecânico de camada fixa. Para o estudo do fenômeno de higroscopicidade foram utilizadas as temperaturas de 20, 30, 55 e 70 °C com atividades de água entre 10,75 e 85,11%. O modelo que melhor representou as curvas de secagem foi o modelo de Midilli com R<sup>2</sup> de 0,99. O modelo que melhor representou a curva de equilíbrio higroscópico das folhas de capim-indiano foi o de GAB Modificado com R<sup>2</sup> de 0,94. Com o aumento da temperatura do ar de secagem houve escurecimento das amostras em temperaturas superiores à 45°C.

**Palavras-chave:** Capim-indiano; Planta medicinal; Processamento de produtos agrícolas.

### Abstract

The *Cymbopogon* genus is widely studied for its medicinal characteristics, which are recognized and used worldwide. However, there is a need to study the drying kinetics, hygroscopic balance and the color change of *Cymbopogon flexuosus* leaves by varying the drying temperature. The objective of this work was to study the drying kinetics of Indian grass leaves, to adjust a model among those existing in the literature that best represents the behavior of the sorption isotherm, as well as to analyze the effect of the drying process on the color of the leaves. The Indian grass leaves were cut to a length of 0.2 m and submitted to drying air temperatures of 35, 45, 55 and 70 °C in a fixed layer mechanical dryer. For the study of the hygroscopic phenomenon, temperatures of 20, 30, 55 and 70 °C were used with water activities between 10.75 and 85.11%. The model that best represented the drying curves was the Midilli model with an R<sup>2</sup> of 0.99. The model that best represented the hygroscopic balance curve of Indian grass leaves was that of Modified GAB with R<sup>2</sup> of 0.94. As the drying air temperature increased, the samples darkened at temperatures above 45 °C.

**Keywords:** East indian lemongrass; Medicinal plant; Agricultural products processing.

### Resumen

El género *Cymbopogon* es ampliamente estudiado por sus características medicinales, que son reconocidas y utilizadas en todo el mundo. Sin embargo, es necesario estudiar la cinética de

secado, el equilibrio higroscópico y el cambio de color de las hojas de *Cymbopogon flexuosus* variando la temperatura de secado. El objetivo de este trabajo fue estudiar la cinética de secado de las hojas de hierba india, ajustar un modelo entre los existentes en la literatura que mejor represente el comportamiento de la isoterma de sorción, así como analizar el efecto del proceso de secado en el color de las hojas. Las hojas de hierba india se cortaron a una longitud de 0.2 m y se sometieron a temperaturas de aire de secado de 35, 45, 55 y 70 °C en un secador mecánico de capa fija. Para el estudio del fenómeno higroscópico, se utilizaron temperaturas de 20, 30, 55 y 70 °C con actividades acuáticas entre 10.75 y 85.11%. El modelo que mejor representó las curvas de secado fue el modelo Midilli con un R<sup>2</sup> de 0.99. El modelo que mejor representó la curva de equilibrio higroscópico de las hojas de hierba india fue el GAB modificado con R<sup>2</sup> de 0,94. A medida que aumentaba la temperatura del aire de secado, las muestras se oscurecían a temperaturas superiores a 45 °C.

**Palabras clave:** Césped indio; Planta medicinal; Procesamiento de productos agrícolas.

## 1. Introdução

O *Cymbopogon flexuosus* é comumente conhecido como capim limão, capim cidreira, capim santo, erva príncipe, capim limão da Índia oriental e internacionalmente East Indian Lemongrass. Partes da planta, principalmente as raízes e aéreas, são usadas na indústria, na produção de sabonetes, perfumes e produtos de higiene pessoal e na escala residencial é muito usada como chá para vários propósitos, como: ansiolítico, anticonvulsivante, anti-hipertensivo, hipoglicêmico, hipolipidêmico, antimicrobiano, espasmolítico, cardioprotetor, diurético, calmante e anestésico. Recentemente foi descoberto propriedades antimicrobianas, antioxidantes, antifúngicas e anti-inflamatória para vários tipos de doença (Han et al., 2017).

A parte aérea das plantas é matéria-prima essencial na indústria farmacêutica de fitoterápicos, contudo, devido a serem colhidas com alto teor de água, faz-se necessário a secagem para adequada conservação de suas propriedades ao longo do armazenamento, pois a água é o principal responsável pelo aumento de atividades metabólicas e mudanças físicas e químicas que ocorrem no produto (Hao et al., 2015). A desidratação ou a secagem dos alimentos ajuda na conservação, minimizando a ação dos microrganismos que comprometem a qualidade dos produtos (Zabalaga, et al., 2016). Torna-se necessária a obtenção de informações teóricas sobre o comportamento de cada produto durante a secagem (Silva et al., 2016).

Para que as operações de secagem e armazenamento sejam realizadas adequadamente é necessário conhecer as relações entre o produto e o ar circundante. Ervas medicinais são higroscópicas, o que confere a capacidade de ceder e absorver água do ambiente, fenômeno chamado de dessorção e adsorção de água. O teor de água de um produto higroscópico, quando em equilíbrio com as condições psicrométricas do ar que o envolve é chamado teor de água de equilíbrio e é atingido quando a pressão parcial de vapor de água do produto se iguala com a do ar que o envolve (Dincer & Zamfirescu, 2016).

Os modelos matemáticos que representam a secagem possuem várias equações diferenciais que advêm dos balanços de massas, energia e quantidade de movimento. São equações empíricas (constitutivas) que representam teor de água de equilíbrio e para a cinética de secagem, processo de transferência de calor indispensáveis na predição dos fenômenos (Barbosa et al, 2016). Causam variações diretas nas curvas de secagem obtidas, as quais são descritas utilizando-se da modelagem matemática (Sousa et al., 2018, Liu et al., 2017, Garcia et al., 2019, Santos et al., 2019). A temperatura é o principal fator controlador do processo de secagem, pois quanto maior a temperatura de secagem, mais rápido o produto atinge seu equilíbrio termodinâmico (Silva et al, 2016). Em se tratando da cinética de secagem a literatura apresenta uma série de modelos em diferentes áreas: bananas (Monteiro et al., 2016); feijoa (Castro et al., 2019), mamão (Udomkun et al., 2015), pinhão-manso (Kenedi et al., 2019), carambola (Silva et al, 2016) e vernônia (Alara et al., 2019).

A cor dos produtos é relevante e influencia nas características deste, contudo quando feita de forma visual, por comparação, torna-se subjetiva. Assim, é importante o uso de métodos objetivos, para avaliação quantitativa da cor, tais como espectrofotometria, colorimetria e análise de imagens (Abreu et al., 2015). Descreve-se a cor quantitativamente utilizando-se frequentemente o sistema CIElab, no qual tem-se a demonstração da cor através das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , as quais são respectivamente a representação da luminosidade, intensidade de vermelho e verde e intensidade de amarelo e azul (Moura, Figueiredo & Queiroz, 2014). Luna-Solano et al. (2019) estudaram a variação da cor de folhas de *Cymbopogon citratus* mediante diferentes temperaturas do ar aplicadas durante a secagem. Os autores puderam verificar que temperaturas acima de 60 °C causaram aumento do escurecimento das amostras.

Assim, objetivou-se com este trabalho estudar o equilíbrio higroscópico, a cinética de secagem e seus efeitos na cor de folhas de *Cymbopogon flexuosus* em diferentes temperaturas do ar de secagem, ajustando à modelos matemáticos.

## 2. Metodologia

O experimento, que é quantitativo, foi conduzido no Laboratório de Processamentos de Produtos Agrícolas (LPPA) no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras (UFLA). O material utilizado para o estudo foi o capim-indiano (*Cymbopogon flexuosus*), procedente do Horto de Plantas Medicinais do Departamento de Agricultura da UFLA.

As folhas foram selecionadas de forma que apresentassem cor uniforme. Para tanto, foram retiradas as partes doentes e danificadas, assim como qualquer parte de outro vegetal ou material estranho. Após a seleção, as folhas foram cortadas transversalmente no comprimento de 0,20 m. Para a secagem, utilizou-se um secador estático de laboratório com temperaturas do ar de 35, 45, 55 e 70°C.

Para o monitoramento da velocidade do ar de secagem na entrada do ventilador, utilizou-se um anemômetro de pás rotativas e se manteve o ar com velocidade constante, em aproximadamente 0,33 m.s<sup>-1</sup> durante o processo de secagem. As bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, durante o processo de secagem, com a intenção de acompanhar a perda de água. Foi utilizada balança de precisão Shimadzu modelo UX-8200S, e realizadas pesagens desde o início do teste, e posteriormente, em intervalos regulares de 15 minutos, até que fosse atingida massa constante.

As medidas de temperatura do ar ambiente e umidade relativa ambiente foram feitas por meio de dois dataloggers, e para leitura da temperatura do ar de secagem utilizou-se três termopares do tipo “T” conectados a uma central de aquisição de dados. A umidade relativa do ar secante foi determinada por meio do software GRAPSI 5.1<sup>®</sup>.

O teor de água das amostras de capim-indiano foi determinado utilizando-se o método da estufa com temperatura de 105 ± 1°C por peso constante, de forma gravimétrica, conforme Normas Analíticas (Instituto Adolfo Lutz, 2005).

A partir dos dados obtidos durante a secagem foram realizadas as análises de equilíbrio higroscópico, cinética de secagem e de cor.

### Equilíbrio Higroscópico

Os testes de higroscopicidade foram realizados em câmara incubadora BOD e estufa, sendo as amostras armazenadas de forma hermética com controle de temperatura e umidade relativa do ar. Para cada teste de equilíbrio higroscópico foram utilizadas amostras de,

aproximadamente, 0,005 kg de folhas, colocadas em saches telados de plástico *nylon*, de forma a garantir uma maior superfície de contato do material com o ambiente.

As temperaturas dos experimentos foram obtidas a partir das regulagens das câmaras e estufas, e a umidade relativa a partir das soluções utilizadas, sendo as temperaturas experimentadas de 20°C, 30°C, 55°C e 70°C, por 96 horas. As soluções utilizadas para o experimento e suas respectivas umidades relativas de equilíbrio em função da temperatura do ar ambiente estão dispostas na Tabela 1 (Greenspan, 1977).

**Tabela 1** – Umidade relativa de equilíbrio (%) de soluções salinas saturadas.

Temperatura (°C)	Sais	UR (%)	
20	Cloreto de Magnésio	MgCl <sub>2</sub>	33,07 ± 0,18
	Cloreto de Lítio	LiCl	11,31 ± 0,31
	Cloreto de Potássio	KCl	85,11 ± 0,29
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO <sub>3</sub> )	54,38 ± 0,23
	Acetato de Potássio	CH <sub>3</sub> COOK	23,11 ± 0,25
30	Cloreto de Magnésio	MgCl <sub>2</sub>	32,44 ± 0,14
	Cloreto de Lítio	LiCl	11,28 ± 0,24
	Cloreto de Potássio	KCl	83,62 ± 0,25
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO <sub>3</sub> )	51,40 ± 0,24
	Acetato de Potássio	CH <sub>3</sub> COOK	21,61 ± 0,53
55	Cloreto de Lítio	LiCl	11,03 ± 0,23
	Cloreto de Potássio	KCl	80,70 ± 0,35
	Brometo de Sódio	NaBr	50,15 ± 0,65
	Cloreto de Magnésio	MgCl <sub>2</sub>	29,93 ± 0,16
70	Cloreto de Lítio	LiCl	10,75 ± 0,33
	Cloreto de Potássio	KCl	79,49 ± 0,57

Fonte: Greenspan, 1977.

Observa-se pela Tabela 1 que para uma mesmo sal, a umidade relativa de equilíbrio é maior de acordo com o aumento da temperatura. Além disso, cada sal em uma mesma temperatura, proporciona a formação de diferentes umidades relativas.

Para a verificação e quantificação do fenômeno de equilíbrio higroscópico, ainda em laboratório, as amostras foram pesadas antes e depois de serem, respectivamente, colocadas e retiradas da câmara e estufa, após entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente circundante em condições herméticas. As pesagens foram realizadas em balança semi analítica, GEHAKA modelo BK600, com precisão de 3 casas decimais. Dessa maneira, foram verificados os diversos teores de água de equilíbrio para as várias combinações de temperatura e umidade

relativa do ar. Para um melhor tratamento dos dados foram utilizadas, para cada combinação de umidade relativa do ar e temperatura, a média de 3 repetições.

De acordo com Teixeira, Andrade, & Silva (2012), os modelos matemáticos obtidos na literatura e representativos da higroscopicidade de produtos agrícolas, utilizados para análise do capim-indiano, foram escolhidos aleatoriamente em função da avaliação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, para a verificação do que melhor se ajustasse à realidade empírica do produto, de maneira a melhor representar sua isoterma. Os modelos utilizados estão presentes na Tabela 2.

**Tabela 2** – Modelos matemáticos usados para a representação do equilíbrio higroscópico.

Modelo	Equação	
Chung Pfost	$U_e = a - b \cdot \ln[-(T + c) \cdot \ln(UR)]$	(1)
Copace	$U_e = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot UR)]$	(2)
GAB Modificado	$U_e = ab(c / T)UR \{ [1 - b UR] [1 - b UR + b(c / T)UR] \}$	(3)
Halsey Modificado	$U_e = [\exp(a - bT) / - \ln(UR)]^{1/c}$	(4)
Henderson	$U_e = [\ln(1 - UR) / (- a \cdot T_{abs})]^{1/b}$	(5)
Henderson Modificado	$U_e = \{ \ln(1 - UR) / [- a \cdot (T + b)] \}^{1/c}$	(6)
Oswin	$U_e = (a - b \cdot T) / [(1 - UR) / UR]^{1/c}$	(7)
Sabbab	$U_e = a (UR^b / T^c)$	(8)
Sigma Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(UR)]\}$	(9)
Andrade	$U_e = \exp\{(a UR) + (T^b) + ((T - UR) / UR)^b\}^c$	(10)

Onde,

$U_e$ : Teor de água do produto, b.s.;

UR: Umidade relativa do ar, decimal;

T: Temperatura do ar ambiente, C;

$T_{abs}$ : Temperatura absoluta do ar ambiente,

K; a, b, c: Parâmetros que dependem da natureza do produto.

Por meio da Tabela 2 se é possível observar diferentes equações empíricas ou semi-empíricas que descrevem as curvas de equilíbrio higroscópico de produtos agrícolas. Utilizando-se destes modelos matemáticos, será escolhido aquele que melhor representa o caso do capim-indiano conforme os resultados experimentais obtidos no presente artigo.

Segundo Teixeira, Andrade, & Silva (2012), para a análise dos dados foi considerada a atividade de água ( $a_w$ ) como sendo igual a umidade relativa do ar, em decimal. Para estimar

os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais foi utilizado o programa STATISTICA versão 5.0, com modelagem não linear.

Na análise de representatividade de higroscopicidade dos modelos, os dados experimentais foram comparados com os valores estimados por cada modelo, verificando-se a porcentagem de erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), e teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), de acordo, respectivamente, com as equações a seguir (Mathai & Haubold, 2018).

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (11)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{Y}}{GLR}} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (13)$$

onde:

Y: valor observado experimentalmente;

$Y_0$ : valor calculado pelo modelo;

n: número de observações experimentais;

GLR: graus de liberdade do modelo.

De acordo com Simha et al. (2016), a capacidade de um modelo para descrever com finalidade um determinado processo físico é inversamente proporcional ao desvio-padrão da estimativa (SE). O grau de ajuste de cada modelo irá considerar a magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a magnitude do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE).

### **Cinética de Secagem**

A partir dos dados obtidos durante a secagem foram construídos gráficos de curva de secagem em função do tempo. Para estimar os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais foi utilizado o programa STATISTICA versão 5.0, pelo método Quasi-Newton, com modelagem não linear. Os modelos de cinética de secagem foram ajustados aos dados experimentais utilizando-se doze diferentes equações empíricas e semi-empíricas relacionadas conforme apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** – Modelos utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas.

Modelo	Equação	
Dois Termos	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(14)
Henderson e Pabis Mod.	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(15)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k t) + c$	(16)
Midilli	$RU = a \exp(-k t^n) + bt$	(17)
Newton	$RU = \exp(-k t)$	(18)
Page	$RU = \exp(-k t^n)$	(19)
Thompson	$RU = \exp((-a(a^2 + 4bt)^{0.5})/2b)$	(20)
Verma	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kt)$	(21)
Wang & Sing	$RU = 1 + a t + b t^2$	(22)
Valcam	$RU = a + b t + c t^{1.5} + d t^2$	(23)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	(24)
Aproximação da Difusão	$RU = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(25)

em que,

RU - razão de umidade do produto, adimensional;

t - tempo de secagem, h;

k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> - coeficientes de secagem, h<sup>-1</sup>;

a, b, c, n - constantes dos modelos, adimensional.

Por meio da Tabela 03 se é possível observar diferentes equações empíricas ou semi-empíricas que descrevem as curvas de cinética de secagem de produtos agrícolas. Utilizando-se destes modelos matemáticos, será escolhido aquele que melhor representa o caso da secagem de capim-indiano conforme os resultados experimentais obtidos no presente artigo.

Para o cálculo da razão de umidade (RU) durante as secagens nas diferentes temperaturas, utilizou-se a expressão:

$$RU = (U - U_e) / (U_i - U_e) \quad (26)$$

em que,

U - teor de água do produto, decimal b.s.

U<sub>i</sub> - teor de água inicial do produto, decimal b.s.

U<sub>e</sub> - teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

Onde a umidade de equilíbrio (U<sub>e</sub>), é calculada pela equação 27 descrito pelo modelo de GAB Modificado utilizando as constantes obtidas no presente trabalho.

$$U_e = 0,492 * 0,088(352,731/T)UR \{ [1 - 0,088UR] [1 - 0,088UR + 0,088(352,731/T)UR] \}$$

em que, (27)

U<sub>e</sub>: Teor de água do produto, b.s.;

UR: Umidade relativa do ar de secagem, decimal;

T: Temperatura do ar de secagem, °C

Para a análise de representatividade da cinética de secagem dos modelos, os dados experimentais foram comparados com os valores estimados por cada modelo, verificando-se a porcentagem de erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), de acordo, respectivamente (Simha et al., 2016).

Segundo Corrêa, Machado, & Andrade (2001), a taxa de redução de água é definida como a quantidade de água que um determinado produto perde por unidade de matéria seca do produto por unidade de tempo, como pode ser visto na Equação 28.

$$TRA = \frac{M_{a_0} - M_{a_i}}{M_s(t_i - t_0)} \quad (28)$$

em que,

TRA: taxa de redução de água, em  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ;

$M_{a_0}$ : massa de água total anterior, em kg;

$M_{a_i}$ : massa de água total atual, em kg;

$M_s$ : matéria seca, em kg;

$t_0$ : tempo total de secagem anterior, em h;

$t_i$ : tempo total de secagem atual, em h.

### **Análise de Cor**

A quantificação da cor foi determinada pela leitura direta de reflectância das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , em colorímetro Minolta modelo CR-410. Para cada análise foram realizadas sete leituras.

## **3. Resultados e Discussão**

### **Equilíbrio Higroscópico**

O teor de água de equilíbrio das folhas de *C. flexuosus* para as temperaturas de 20, 30, 55 e 70 °C, com atividade de água entre 0,11 e 0,85, se estabeleceram entre 0,02 e 0,33. (b.s.) (TABELA Tabela 4).

**Tabela 4** – Valores médios do teor de água de equilíbrio (b.s.) para as diferentes combinações de atividade de água e temperatura após 96 h.

Temperatura (°C)	Sais		Aw	Teor de Água de Equilíbrio (b.s.)
20	Cloreto de Lítio	LiCl	0.1131 ± 0.31	0.064616
20	Acetato de Potássio	CH3COOK	0.2311 ± 0.25	0.118239
20	Nitrato de Magnésio	Mg(NO3)	0.5438 ± 0.23	0.244509
20	Cloreto de Potássio	KCl	0.8511 ± 0.29	0.326695
30	Cloreto de Lítio	LiCl	0.1128 ± 0.31	0.061774
30	Acetato de Potássio	CH3COOK	0.2161 ± 0.25	0.097793
30	Nitrato de Magnésio	Mg(NO3)	0.514 ± 0.23	0.193188
30	Cloreto de Potássio	KCl	0.8362 ± 0.29	0.226338
55	Cloreto de Magnésio	MgCl	0.2993 ± 0.16	0.088161
55	Cloreto de Potássio	KcCl	0.807 ± 0.35	0.186009
70	Cloreto de Lítio	LiCl	0.1075 ± 0.33	0.021231

Os valores de teor de água de equilíbrio obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 4.

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, para um sistema em mudança a força motriz é a diferença na energia livre da substância em mudança de estado. Ou seja, se dois produtos em um ambiente, por exemplo solução salina e planta, possuem a mesma atividade de água, a água presente em cada produto terá o mesmo potencial químico o que resulta na estabilização de cada produto no equilíbrio (Labuza & Altunarkar, 2007).

Os valores experimentais das curvas de sorção em diferentes temperaturas foram obtidos por meio da média dos teores de água de equilíbrio. A partir deste resultado, foram determinados seus respectivos parâmetros, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), o erro relativo médio (P) e o erro relativo estimado médio (SE). Na Tabela 5, a seguir, são apresentados os valores estimados a partir dos modelos de teor de água de equilíbrio em folhas de *C. flexuosus*.

**Tabela 5** – Parâmetros estimados, coeficientes de determinação ( $R^2$ ), erro relativo médio (P) e erro estimado médio (SE) para cada modelo analisado.

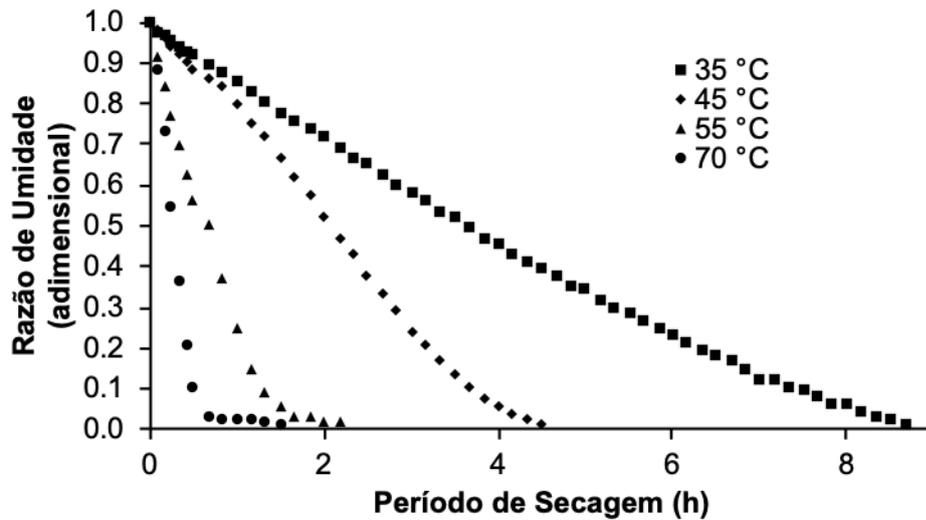
	a	b	c	$R^2$	P (%)	SE (decimal)
CHUNG PFOST	0.3989	0.0775	1.0931	92.4370	22.2871	0.0610
COPACE	2.1525	0.0166	1.6008	95.0180	25.1690	0.0618
GAB MOD.	0.4924	0.0877	352.7309	94.2140	9.2436	0.0315
HALSEY MOD.	3.6528	0.0366	2.2990	91.7600	30.2929	0.0738
HENDERSON	0.0792		1.9613	82.6370	31.8538	0.1225
HENDERSON MOD.	1.1964	-4.5665	2.0632	96.5700	18.7509	0.0434
OSWIN	0.2264	-0.0022	3.0916	95.5130	22.2162	0.0618
SABBAH	1.9840	0.7293	0.5663	93.6820	11.7283	0.0282
SIGMA COPACE	2.9035	0.0165	0.9033	91.9640	30.6119	0.0739
GAB	0.5899	125.2885	0.0072	77.8880	29.3022	0.0864
BET MOD.	0.0038	119.5932	-0.0059	75.9540	28.7326	0.0854
SMITH	0.1355	0.0019	0.1081	92.6640	25.2550	0.0775
ANDRADE	2.0904	0.2941	-0.3575	96.6060	13.3646	0.0393

De acordo com Teixeira e outros colaboradores (2012), para que os modelos sejam satisfatoriamente representativos, os valores de P e  $R^2$  devem ser menores que 10% e próximos de 100%, respectivamente. Tendo isto em vista, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 5, o modelo que descreve os resultados obtidos experimentalmente de forma mais satisfatória é o de GAB Modificado. Desta forma, este modelo pode ser usado para representar o fenômeno de teor de água de equilíbrio em outras aplicações.

### **Cinética de Secagem**

Por meio da Figura 1 são apresentadas as curvas de secagem em diferentes temperaturas do ar para as folhas de *Cymbopogon flexuosus*. Observa-se por meio da Figura 1 que o período de secagem decresce com o aumento da temperatura do ar de secagem

**Figura 1** – Razão de umidade em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem das folhas de *C. flexuosus*.



As curvas da cinética de secagem apresentadas na Figura 1 mostram que conforme o aumento da temperatura do ar de secagem há a diminuição do período de secagem. Para as temperaturas entre 35 e 70 °C pode-se observar uma redução maior de seis horas do tempo de secagem.

Para a realização da modelagem matemática representativa da cinética de secagem foram utilizados os modelos descritos na Tabela 6, e para cada modelo foram determinados seus respectivos parâmetros, coeficientes de determinação ( $R^2$ ), erros médios relativos (P), erros médios estimados (SE) e teste de qui-quadrado ( $X^2$ ). A seguir, são apresentados os resultados estimados conforme modelos matemáticos de cinética de secagem ajustados para folhas de *C. flexuosus*.

**Tabela 6** – Parâmetros obtidos dos modelos ajustados aos dados de secagem das folhas de *C. flexuosus* para as temperaturas do ar de secagem de 35, 45, 55 e 70 °C.

	a	k	b	k0	c	k1	n	d	R2	P
<b>35 °C</b>										
Dois Termos	0.536		0.536	0.242		0.242			96.529	5.018
Henderson e Pabis Mod.	0.357	0.242	0.357	0.242	0.357	0.242			96.529	5.018
Henderson e Pabis	1.072	0.242							96.529	5.018
Midilli	0.983	0.107	0.027				1.193		99.974	0.375
Newton		0.224							96.655	5.487
Page		0.115					1.440		99.158	2.470
Thompson	-5.414		0.846						99.109	2.544
Verma	-0.036	0.242				0.242			96.529	5.018
Wang & Sing	-0.155		0.005						99.963	0.490
Valcam	0.988	0.111	0.111		0.033			0.011	99.985	4.543
Exponencial de Dois Termos	1.000	0.224							95.655	5.487
Aproximação da Difusão	262.540	0.447	0.997						98.968	2.684
<b>45 °C</b>										
Dois Termos	0.553		0.553	0.455		0.455			93.858	7.424
Henderson e Pabis Mod.	0.369	0.455	0.369	0.455	0.369	0.455			93.858	7.424
Henderson e Pabis	1.107	0.455							93.858	7.424
Midilli	0.965	0.158	0.024				1.762		99.882	0.898
Newton		0.406							91.976	8.344
Page		0.200					1.795		99.256	2.517
Thompson	-2.829		0.445						96.260	5.562
Verma	-0.053	0.455				0.455			93.858	7.424
Wang & Sing	-0.248		0.003						99.276	2.331
Valcam	0.966		0.136		0.436			0.128	99.849	1.078
Exponencial de Dois Termos	2.059	0.675							97.861	4.360
Aproximação da Difusão	462.631	0.917	0.998						98.229	3.965
<b>55 °C</b>										
Dois Termos	0.532		0.532	1.423		1.423			97.836	4.565
Henderson e Pabis Mod.	0.355	1.423	0.355	1.423	0.355	1.423			97.836	4.565
Henderson e Pabis	1.064	1.423							97.836	4.565
Midilli	0.969	1.316	0.014				1.349		99.506	1.978
Newton		1.327							97.293	5.147
Page		1.432					1.325		99.320	2.195
Thompson	-0.867		0.087						98.953	2.934
Verma	0.008	1.254				1.179			98.318	3.986
Wang & Sing	-0.991		0.248						99.700	1.233
Valcam	0.989		0.759		0.379			0.403	99.754	1.299
Exponencial de Dois Termos	1.840	1.940							99.182	2.423
Aproximação da Difusão	0.711	1.327	1.000						97.293	5.147
<b>70 °C</b>										
Dois Termos	0.548		0.548	3.378		3.378			96.770	5.048
Henderson e Pabis Mod.	0.365	3.378	0.365	3.378	0.365	3.378			96.770	5.048
Henderson e Pabis	1.095	3.378							96.770	5.048
Midilli	0.983	7.532	0.014				1.810		99.890	0.986
Newton		3.093							95.889	5.310
Page		6.868					1.723		99.785	1.376
Thompson	-0.401		0.027						95.766	5.465
Verma	0.001	1.744				3.058			95.920	5.463
Wang & Sing	-2.061		0.982						95.969	5.905
Valcam	1.077		3.962		3.669			0.808	97.581	4.837
Exponencial de Dois Termos	2.103	5.161							99.411	2.256
Aproximação da Difusão	0.831	3.093	1.000						95.889	5.310

Ao se analisar os resultados dos modelos matemáticos da Tabela 6, observa-se que o modelo de Midilli foi o que melhor representou o fenômeno de secagem de folhas de *C. flexuosus*. Desta forma, na tabela são apresentados os parâmetros, coeficientes de determinação ( $R^2$ ), erros médios relativos (P), erros médios estimados (SE) e teste de qui-quadrado ( $X^2$ ), ajustados ao modelo de Midilli.

Pelos valores obtidos, observa-se por meio da Tabela 7 que, para cada temperatura de secagem, a constante de secagem “k” aumenta com o incremento da temperatura do ar de secagem. Segundo Madamba et al. (1996), o coeficiente “k” está relacionado com a difusividade efetiva no processo de secagem. Conforme relatado na literatura, outros autores também constataram aumento da constante “k” conforme incremento da temperatura do ar de secagem (Martinazzo et al., 2010; Goneli et al., 2014; Silva et al., 2015; Leite et al., 2017; Mghazli et al., 2017; Santos et al., 2019).

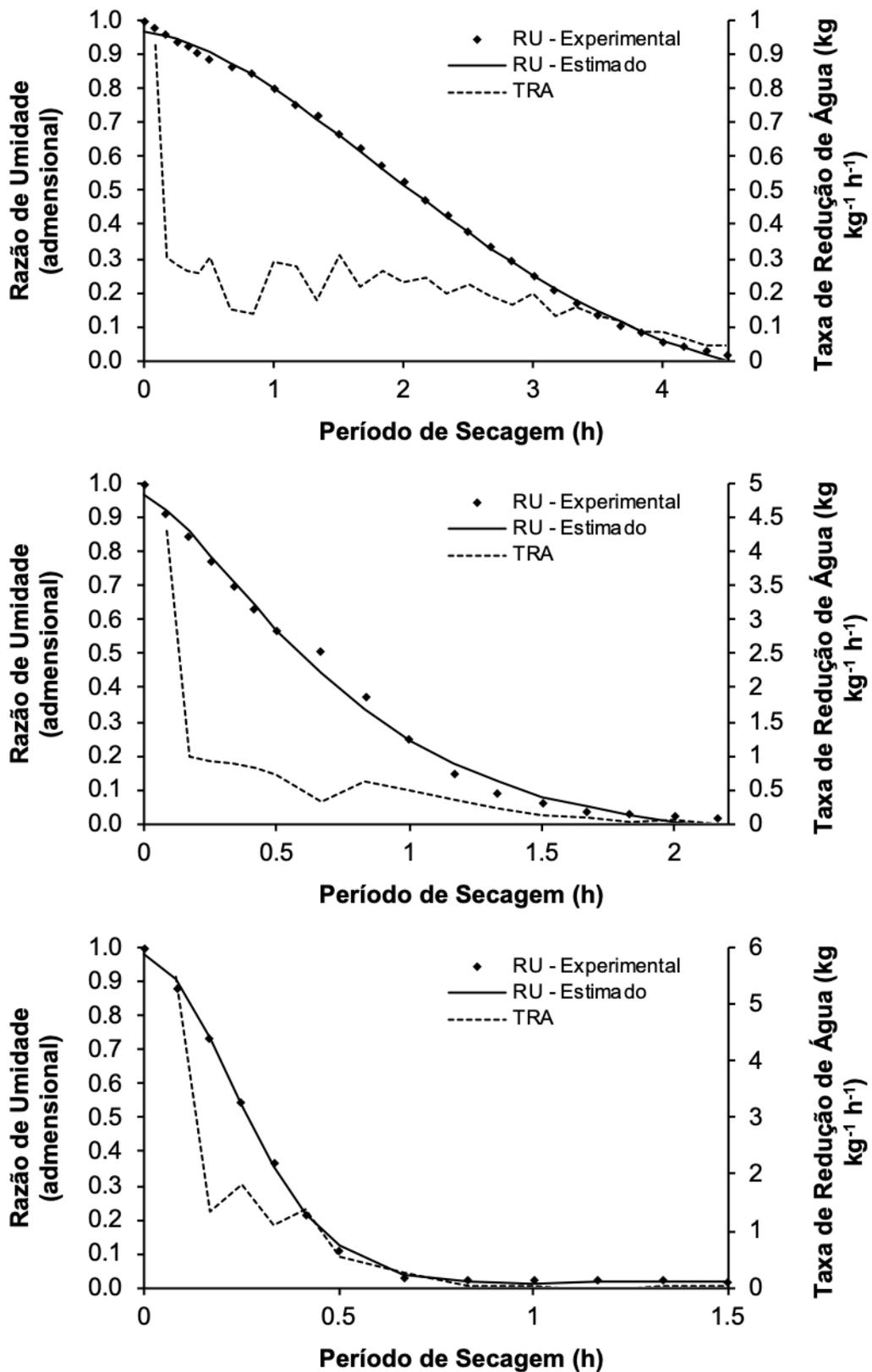
**Tabela 7** – Parâmetros obtidos do modelo de Midilli, ajustado aos dados experimentais de secagem das folhas de *C. flexuosus*, para as diferentes temperaturas do ar de secagem.

Temperatura (°C)	a	k	b	d	$R^2$	P
35	0.983	0.107	0.027	1.193	99.974	0.375
45	0.965	0.158	0.024	1.762	99.882	0.898
55	0.969	1.316	0.014	1.349	99.506	1.978
70	0.983	7.532	0.014	1.810	99.890	0.986

Se observa por meio da Tabela 7 que há o aumento do coeficiente “k”, o qual se relaciona com a difusividade efetiva no processo de secagem. Além disso, os modelos das diferentes temperaturas experimentadas obtiveram  $R^2$  superior à 99%.

Na Figura 2 são apresentados os valores de razão de umidade experimental e estimada pelo modelo de Midilli e as taxas de redução de água para as temperaturas estudadas.

**Figura 2** – Razão de umidade experimental e estimada pelo modelo de Midilli e taxa de redução de água, para as temperaturas de (a) 35 °C, (b) 45 °C, (c) 55 °C e (d) 70 °C.



De acordo com os resultados obtidos experimentalmente, o teor de água de equilíbrio foi atingido em diferentes períodos conforme temperatura do ar de secagem. Os períodos de secagem das temperaturas de 35, 45, 55 e 70 °C ocorreram após 8,7; 4,5; 2,2 e 1,5 h, respectivamente. Martinazzo e outros colaboradores (2010) estudaram as curvas de cinética de secagem de folhas de *Cymbopogon citratus* cortadas em 0,20 cm. Foi verificado pelos autores que os períodos de secagem para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C foram respectivamente de 18 h, 8,3 h e 3,6 h.

Assim como observado por Corrêa Filho et al. (2015) para o figo variando as temperaturas entre 40 e 70 °C, é possível observar também que a taxa de redução de água durante o processo de secagem se apresentou homogênea sem variações excessivas para todas as temperaturas estudadas, indicando que a secagem foi realizada de forma equilibrada.

### Análise de Cor

As avaliações colorimétricas das folhas de *C. flexuosus* após as secagens estão apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8** – Resultados dos coeficientes da análise de cor: a\*, b\*, L\*, h e C para as folhas de capim-indiano mediante a variação de temperatura entre 35 e 70 °C.

	Temperatura de Secagem (°C)			
	35	45	55	70
a*	8.29 <sup>a</sup>	6.16 <sup>b</sup>	6.92 <sup>b</sup>	5.88 <sup>b</sup>
b*	-12.92 <sup>a</sup>	-9.90 <sup>b</sup>	-9.81 <sup>b</sup>	-8.81 <sup>b</sup>
L*	66.64 <sup>a</sup>	66.61 <sup>a</sup>	61.49 <sup>b</sup>	59.86 <sup>b</sup>
h	-1.00 <sup>a</sup>	-1.01 <sup>a</sup>	-0.96 <sup>a</sup>	-0.98 <sup>a</sup>
C	15.35 <sup>a</sup>	11.67 <sup>b</sup>	12.01 <sup>b</sup>	10.59 <sup>b</sup>

\* Letras diferentes na horizontal diferem-se entre si pelo método de Scott-Knott à 5% de significância.

Se observa por meio da Tabela 8 que houve diferença significativa da luminosidade das amostras secadas em temperaturas a partir de 55 °C. Ou seja, temperaturas do ar de secagem superiores à 55 °C promovem escurecimento das folhas de *C. flexuosus*.

A coordenada L\*, que varia de 0 a 100, sendo que próximo à 0 a luminosidade é escura e próxima a 100 é branca. Observa-se que para os resultados obtidos não houve diferença significativa nas temperaturas de 35 °C e 45 °C e da mesma forma, as temperaturas

de 55 °C e 70 °C também não apresentaram diferenças estatísticas significativas. Ou seja, as temperaturas de 55 °C e 70 °C escureceram as folhas de *C. flexuosus*.

A coordenada  $a^*$  reflete o quanto foi degradada a cor verde da folha, durante o processo de secagem. Quanto menor for o valor da coordenada  $a^*$ , mais próximo da cor verde, enquanto que quanto maior o valor da coordenada  $a^*$ , mais próximo ao vermelho. Pelos dados apresentados na Tabela 08, é possível verificar que não houve diferença significativa a partir da temperatura de 45 °C. Ou seja, a temperatura do ar de secagem de 35 °C apresentou resultados significativamente mais verdes que os demais tratamentos.

Já a coordenada  $b^*$ , varia entre o azul ( $-b^*$ ) e o amarelo ( $+b^*$ ). De acordo com os dados obtidos experimentalmente, a temperatura do ar de secagem de 35 °C ocasiona em uma diferença significativa da coordenada  $b^*$  com relação às demais temperaturas estudadas. Assim, pode-se concluir que as temperaturas do ar de secagem de 35 °C e 45 °C apresentaram uma coloração mais próxima da cor natural das folhas de *C. flexuosus*, ou seja, uma coloração mais clara e mais esverdeada.

Além de provocar escurecimento na cor das folhas, a secagem em altas temperaturas pode modificar negativamente a composição do óleo essencial de plantas aromáticas e condimentares. Dorneles et al. (2019) verificaram que temperaturas superiores à 60 °C provocam degradação de alguns componentes do óleo essencial de malvarisco. Assim, para estudos futuros deve-se também estudar o rendimento e a composição do óleo essencial, provocado por variações da temperatura do ar de secagem.

#### 4. Considerações Finais

Os resultados apresentados neste trabalho acrescentam informações sobre a cinética de secagem, equilíbrio higroscópico e colorimetria de folhas de *C. flexuosus*, que não se encontravam na literatura até o momento. Assim, podem ser projetados equipamentos para a secagem adequada do capim-indiano.

Os resultados foram alcançados integralmente, onde:

O modelo de GAB Modificado foi o que melhor descreveu o fenômeno de equilíbrio higroscópico de folhas da capim-indiano.

Já o modelo de Midilli foi o que melhor descreveu o fenômeno de secagem das folhas de capim-indiano.

Temperaturas do ar de secagem superiores à 45°C escureceram significativamente as folhas de capim-indiano.

Para trabalhos futuros, os autores sugerem a secagem de outras plantas medicinais, aromáticas e condimentares ainda não descritas na literatura.

## Referências

- Abreu, G. F. et al. (2015) Alterações na coloração de grãos de café em função das operações pós-colheita. *Coffe Science*, 10(4), 429-436.
- Alara, O. R., Abdurahman, N. H. & Olalere, O. A. (2019) Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of *Vernonia amygdalina* leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(3), 309-315.
- Barbosa, K. F. et al. (2016) Desorption isotherms and isosteric heat of 'cajuzinho-do-cerrado' achenes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(5), 481-486.
- Castro, A. M.; Mayorga, E. Y.; Moreno, F. L. (2019) Mathematical modelling of convective drying of feijoa (*Acca sellowiana* Berg) slices. *Journal of food engineering*, 252, 44-52.
- Corrêa Filho, L. C. et al. (2018) Post-harvest of parsley leaves (*Petroselinum crispum*): Mathematical modelling of drying and sorption processes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 131-136.
- Corrêa, P. C.; Machado, P. F.; Andrade, E. T. (2001) Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. *Ciência e Agrotecnologia*, 25(1), 134-142.
- Da, H., Gu, X. J. & Xiao, P. G. (2015) *Medicinal plants: chemistry, biology and omics*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Dinçer, İ. & Zamfirescu, C. (2016) *Drying phenomena: theory and applications*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Dorneles, L. N. S. et al. (2019) Effect of air temperature and velocity on drying kinetics and essential oil composition of *Piper umbellatum* L. leaves. *Industrial Crops and Products*, 142, 111846.

Garcia, J. N. et al. (2019). Cinética de secagem de capim-limão (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf). *Global Science And Technology*, 12(2).

Goneli, A. L. D. et al. (2014) Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa agropecuária tropical*, 44(1), 56-64.

Greenspan, L. et al. (1977) Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of research of the national bureau of standards*, 81(1), 89-96.

Han, X. & Parker, T. L. (2017) Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) essential oil demonstrated anti-inflammatory effect in pre-inflamed human dermal fibroblasts. *Biochimie open*, 4, 107-111.

Instituto Adolfo Lutz (2005) *Métodos físico-químicos para análise de alimentos: normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz*. 4ª ed. Brasília (DF): ANVISA, 1018pp.

Keneni, Y. G.; Hvoslef-Eide, Ak Trine; Marchetti, J. M. (2019) Mathematical modelling of the drying kinetics of *Jatropha curcas* L. seeds. *Industrial crops and products*, 132, 12-20.

Labuza, T. P.; Altunakar, B. (2007) Water Activity Prediction, and Moisture Sorption Isotherms. In: Barbosa-Cánovas, G. V.; Fontana Júnior, A. J.; Schmidt, S. J.; Labuza, T. P. *Water activity in foods: Fundamentals and Applications*. Ames: Blackwell Publishing Professional, Cap. 05, p. 109-154.

Leite, D. D. F. et al. (2017) Modelagem matemática da cinética de secagem da casca do abacaxi. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 12(4), 769-774.

Liu, Y. et al. (2017) Hot air drying of purple-fleshed sweet potato with contact ultrasound assistance. *Drying Technology*, 35(5), 564-576.

Madamba, P. S.; Driscoll, R. H.; Buckle, K. A. (1996) The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of food engineering*, 29(1), 75-97.

Martinazzo, A. P. et al. (2010) Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão [*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf]. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, 12(4), 488-498.

Mathai, A. M.; Haubold, H. J. (2017) *Probability and Statistics: A Course for Physicists and Engineers*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Mghazli, S. et al. (2017) Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. *Renewable Energy*, 108, 303-310.

Monteiro, R. L.; Carciofi, B. A. M.; Laurindo, J. B. (2016) A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. *Journal of Food Engineering*, 178, 1-11.

Moura, R. L.; De Figueirêdo, R. M. F.; De Melo Queiroz, A. J. (2014) Processamento e caracterização físico-química de néctar goiaba-tomate. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 9(3), 68-74.

Pereira, A.S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em: [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic\\_Computacao\\_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1). Acesso em: 20 Abril 2020.

Santos, D. C. et al. (2019) Drying kinetics and thermodynamic properties of patawa pulp (*Oenocarpus bataua* Mart.). *Brazilian Journal of Food Technology*, 22.

Silva Filho, E. D. et al. (2016) Cinética de secagem em camada de espuma da polpa da manga cv. Haden. *Comunicata Scientiae*, 7(3), 354-361.

Silva, L. A. et al. (2015) Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de jenipapo (*Genipa americana* L.). *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, 17(4), 953-963.

Silva, R. B. et al. (2016) Estudo da cinética de secagem de polpa de carambola. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, 10(2), 2069-2080.

Simha, P.; Mathew, M.; Ganesapillai, M. (2016) Empirical modeling of drying kinetics and microwave assisted extraction of bioactive compounds from *Adathoda vasica* and *Cymbopogon citratus*. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 141-150.

Sousa, K. S. M. et al. (2018) Estudo da cinética de secagem do coentro sob ação da radiação direta e difusa. *Nucleus*, 15(2), 423-432.

Teixeira, L. P. ; Andrade, E. T.; Da Silva, P. G. L. (2012) Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi. *Engevista*, 14(2).

Udomkun, P. et al. (2015) Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. *LWT-Food Science and Technology*, 64(1), 67-73.

Zabalaga, R. F.; La Fuente, C. I.A.; Tadini, C. C. (2016) Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying. *Journal of food engineering*, 187, 62-69.

#### **Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Filipe da Silva de Oliveira – 30%

Ednilton Tavares de Andrade – 20%

Paula de Almeida Rios – 20%

Kátia Soares Moreira – 20%

Luís Gustavo Amaral Sálvio – 10%