

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS CERES**  
**BACHARELADO EM AGRONOMIA**  
**SAMUEL GONÇALVES FERREIRA DOS SANTOS**

**CINÉTICA DE SECAGEM E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE FATIAS DE  
BANANA MAÇÃ TROPICAL (*Musa acuminata*)**

**CERES – GO**  
**2019**

**SAMUEL GONÇALVES FERREIRA DOS SANTOS**

**CINÉTICA DE SECAGEM E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE FATIAS DE  
BANANA MAÇÃ TROPICAL (*Musa acuminata*)**

Trabalho de curso apresentado ao curso de Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia, sob orientação do Prof. Dr. Renato Souza Rodvalho

**CERES – GO  
2019**

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

S237c Santos, Samuel Gonçalves Ferreira dos Santos  
CINÉTICA DE SECAGEM E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS  
DE FATIAS DE BANANA MAÇÃ TROPICAL (Musa acuminata) /  
Samuel Gonçalves Ferreira dos Santos  
Santos; orientador Renato Souza Rodovalho Rodovalho. -  
- Ceres, 2019.  
18 p.

Monografia ( em ) -- Instituto Federal Goiano,  
Campus Ceres, 2019.

1. Água. 2. Energia. I. Rodovalho, Renato Souza  
Rodovalho, orient. II. Título.



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- Tese
- Dissertação
- Monografia – Especialização
- TCC - Graduação
- Produto Técnico e Educacional - Tipo: \_\_\_\_\_
- Artigo Científico
- Capítulo de Livro
- Livro
- Trabalho Apresentado em Evento

Nome Completo do Autor: Samuel Gonçalves Loures do Santo  
Matrícula: 2015103200210307

Título do Trabalho: Caracterização de Sulfato e propriedades termodinâmicas de fatos de Bauxita mais Lepidocrocita (Mussa e outros)

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01/10/20

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não  
O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

- O/A referido/a autor/a declara que:
- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
  - obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
  - cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Ceres Local 22/11/19 Data

Samuel Gonçalves Loures do Santo  
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Paula Sara Pacheco  
Assinatura do(a) orientador(a)

#### ANEXO IV - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) nove dia(s) do mês de Outubro do ano de dois mil e dezanove, realizou-se a defesa de Trabalho de Curso do(a) acadêmico(a) Samuel Gonçalves F. dos Santos, do Curso de Bacharelado em Agronomia, matrícula 101201510720210309, cujo título é "Cinética de Secagem e Supriedades Termofísicas de Folhas de Banana Moçã Tropical (Musa acuminate)". A defesa iniciou-se às 14 horas e 00 minutos, finalizando-se às 15 horas e 10 minutos. A banca examinadora considerou o trabalho Aprovado com média 9,1 no trabalho escrito, média 9,0 no trabalho oral, apresentando assim média aritmética final 9,0 de **pontos**, estando o(a) estudante(a) Apto para fins de conclusão do Trabalho de Curso.

Após atender às considerações da banca e respeitando o prazo disposto em calendário acadêmico, o(a) estudante(a) deverá fazer a submissão da versão corrigida em formato digital (.pdf) no Repositório Institucional do IF Goiano – RIIIF, acompanhado do Termo Ciência e Autorização Eletrônico (TCAE), devidamente assinado pelo autor e orientador.

Os integrantes da banca examinadora assinam a presente.



Assinatura Presidente da Banca



Assinatura Membro 1 Banca Examinadora



Assinatura Membro 2 Banca Examinadora

*Este trabalho é dedicado ao meus pais, meus amigos e  
minha família que sempre me ajudaram e apoiaram  
durante toda esta jornada acadêmica.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Primeiramente a Deus, por ter me concedido a vida e as habilidades necessárias para conseguir realizar este trabalho.*

*Aos meus pais Silvano Ferreira dos Santos e Kênia Aparecida Gonçalves Pires, por sempre estarem comigo nos momentos fáceis e difíceis.*

*Ao Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, a qual tenho uma imensa gratidão e orgulho por ter estudado nessa instituição, tanto pelos servidores e os docentes ao longo de toda graduação*

*Ao professor Dr. Renato Souza Rodovalho, por toda a orientação durante estes cinco anos de graduação.*

*Aos amigos Daniel Pereira da Silva, Juliano Silva Queiroz, Jefferson Kran Sarti, Lays Português Silva, Hélio Soares Miranda Netto e Vinicius Gonçalves Almeida que se envolveram direto e indiretamente neste experimento e pela amizade.*

## RESUMO

A banana é um produto biológico altamente higroscópico. Os produtos higroscópicos possuem a propriedade de sofrerem mudanças em seus teores de água, sob a forma de vapor ou líquido com a ambiente, por meio do processo de absorção ou dessorção. A secagem consiste na remoção de grande parte de água inicialmente contida no produto logo após a maturidade fisiológica, com o objetivo de promover longos períodos de armazenamento. Objetivou-se, neste trabalho, estimar as curvas de secagem de fatias de banana maçã da cultivar BRS Tropical, bem como obter o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas em diferentes condições de secagem em ambiente natural. Aos dados experimentais foram ajustados diversos modelos matemáticos utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas. Com base nos resultados obtidos, o modelo matemático Midilli Modificado é o que melhor representa a cinética de secagem para as fatias de banana maçã tropical. O aumento da temperatura promove: uma taxa maior de remoção de água nas fatias de banana maçã durante a secagem; aumento do coeficiente de difusão efetivo sendo que esta relação pode ser descrita pela equação de Arrhenius; aumento da energia livre de Gibbs, enquanto a entalpia e a entropia decrescem.

**Palavras-chave:** água, energia, frutíferas.



## ABSTRACT

Banana is a highly hygroscopic biological product. Hygroscopic products have the property of undergoing changes in their moisture content, in the form of vapor or liquid with the environment, by means of the absorption or desorption process. Drying consists of the removal of much of the water initially contained in the product soon after the physiological maturity, in order to promote long periods of storage. The objective of this work was to estimate the drying curves of Manzano banana slices of the BRS Tropical cultivar, as well as to obtain the effective diffusion coefficient and the thermodynamic properties under different drying conditions. To the experimental data were adjusted several mathematical models used to represent the drying of agricultural products. Based on the results obtained, the Midilli Modified mathematical model is the one that best represents the drying kinetics for tropical Manzano banana slices. The increase in temperature promotes: a higher rate of water removal in the Manzano banana slices during drying; increase of the effective diffusion coefficient being that this relation can be described by the Arrhenius equation; Gibbs free energy, while enthalpy and entropy decrease.

**Keywords:** water, energy, fruit.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – Valores médios da razão do teor de água (RX) de fatias de banana maçã tropical (decimal) em função do tempo de secagem (horas) em três condições de secagem (sombra, meia-sombra e sol) .....</b>	<b>08</b>
<b>Figura 2 – Curva de secagem de fatias de banana maçã tropical ajustadas ao modelo de Midilli Modificado submetidas a diferentes situações de secagem.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 3 – Valores médios do coeficiente de difusão efetivo (<math>m^2 s^{-1}</math>) obtidos para a secagem de fatias de banana maçã tropical em três situações de secagem (bancada, sombra e sol) .....</b>	<b>13</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem das fatias de banana maçã tropical ajustado aos dados experimentais de razão do teor de água.....</b>	<b>04</b>
<b>Tabela 2 – Valores dos coeficientes de determinação ajustados (<math>R^2</math>), dos erros médios estimados (SE) e do teste do qui-quadrado (SQR) e distribuição de resíduos (Dist) para os modelos matemáticos avaliados.....</b>	<b>09</b>
<b><i>Tabela 3</i> – Coeficientes do modelo Midilli Modificado para as diferentes situações de de secagem de fatias de banana maçã tropical.....</b>	<b>11</b>
<b>Tabela 4 – Propriedades termodinâmicas do processo de secagem de fatias de banana maçã tropical: entalpia específica (<math>\Delta H</math>), entropia específica (<math>\Delta S</math>) e energia livre de Gibbs (<math>\Delta G</math>).....</b>	<b>15</b>

## SUMÁRIO

RESUMO.....	01
INTRODUÇÃO.....	02
MATERIAL E MÉTODOS.....	03
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	07
CONCLUSÕES.....	15
AGRADECIMENTOS.....	16
REFERÊNCIAS.....	16

Cinética de secagem e propriedades termodinâmicas de fatias de banana maçã tropical (*Musa acuminata*)

Samuel Gonçalves Ferreira dos Santos & Renato Souza Rodvalho

RESUMO

A banana é um produto biológico altamente higroscópico. Os produtos higroscópicos possuem a propriedade de sofrerem mudanças em seus teores de água, sob a forma de vapor ou líquido com a ambiente, por meio do processo de absorção ou dessorção. A secagem consiste na remoção de grande parte de água inicialmente contida no produto logo após a maturidade fisiológica, com o objetivo de promover longos períodos de armazenamento. Objetivou-se, neste trabalho, estimar as curvas de secagem de fatias de banana maçã da cultivar BRS Tropical, bem como obter o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas em diferentes condições de secagem ambiente natural. Aos dados experimentais foram ajustados diversos modelos matemáticos utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas. O modelo matemático Midilli Modificado é o que melhor representa a cinética de secagem para as fatias de banana maçã tropical. O aumento da temperatura promove: uma taxa maior de remoção de água nas fatias de banana maçã durante a secagem; aumento do coeficiente de difusão efetivo sendo que esta relação pode ser descrita pela equação de Arrhenius; aumento da energia livre de Gibbs, enquanto a entalpia e a entropia decrescem.

Palavras-chave: água, energia, frutíferas

## INTRODUÇÃO

A área de banana (*Musa* spp.) colhida no Brasil em 2017 foi de 469.471 hectares com uma produtividade de 6.764.324 toneladas (EMBRAPA, 2017). A fruta é comestível, muito nutritiva, sendo fonte de minerais como potássio, cálcio, fósforo, ferro, magnésio, bem como vitaminas.

A secagem consiste na remoção de grande parte de água inicialmente contida no produto logo após a maturidade fisiológica, com o objetivo de promover longos períodos de armazenamento, sem que ocorra perdas significativas durante o processo (Sousa et al., 2015).

De acordo com Radünz et al. (2011), é de inegável importância o ajuste de diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem na tomada de decisão, pois estes contribuem na melhoria da eficiência do processo. Além disso, os modelos matemáticos são ferramentas de engenharia útil que podem facilitar o projeto, a otimização e a simulação do processo de secagem, como também, determinar a energia e o tempo requerido no processo (Kim & Kim, 2017).

A energia de ativação é definida como a menor quantidade de energia necessária para que as moléculas de água ultrapassem as barreiras de energia durante a migração dentro de um produto (Morais et al., 2013). Por meio da energia de ativação é possível determinar as propriedades termodinâmicas dos alimentos que fornecem informações para projeção de equipamentos de secagem; para cálculo da energia requerida neste processo e para estudo das propriedades da água adsorvida (Corrêa et al., 2010, Viganó et al., 2012).

Diante do exposto, objetivou-se, neste trabalho, estimar as curvas de secagem de fatias de banana maçã da cultivar BRS tropical, bem como obter o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas em diferentes condições de secagem em ambiente natural.

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Química Instrumental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano Campus Ceres, município de Ceres, GO. Foram utilizados frutos de bananas, da cultivar BRS maçã tropical, produzidas no próprio Campus, cujas coordenadas são: latitude 15° 16' 30'' S e longitude 49° 35' 54'' W.

A coleta dos frutos foi realizada nas primeiras horas da manhã após ausência de orvalho sobre suas superfícies visando evitar variações no seu teor de água inicial. Em seguida, as bananas foram selecionadas e transportadas para o Laboratório de Química Instrumental do Instituto Federal Goiano Campus-Ceres.

A determinação do teor de água inicial e final dos frutos de banana maçã tropical foi realizado pelo método gravimétrico em estufa de circulação forçada, a  $103 \pm 1$  °C, por 24 h, em três repetições (ASABE, 2010). Já o teor de água de equilíbrio foi determinado pelo modelo de GAB, conforme recomendou Gouveia et al., (2004) para polpa de banana variedade prata. As bananas da variedade maçã tropical foram colhidas com teor de água 3,0 (b.s.).

No laboratório, as polpas de banana maçã tropical foram fatiadas em formato de *chips* e, posteriormente, foram colocadas em Placas de Petri, onde foram divididas em quatro repetições para cada condição de secagem (bancada, sombra e sol). Um termômetro foi utilizado na bancada do Laboratório de Química Instrumental para aferir as temperaturas mínimas e máximas. As amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de quatro casas decimais. Cada placa de Petri foi identificada e recebeu, em média 20 gramas de polpa de banana em formato *chips*, em camada fina, sendo pesadas e levadas para o local de secagem. Realizou-se ao todo 20 pesagens para cada condição de secagem em estudo, sendo o intervalo de cada pesagem de 20 minutos.

A primeira situação de secagem foi a exposição direta ao sol; a segunda foi a exposição a sombra, e pôr fim a terceira, em bancada de laboratório.

Ao final da secagem, foi determinado o teor de água em base seca, e posteriormente, realizado o cálculo da razão do teor de água (RX) durante os processos de secagem pela equação 1.

$$RX = \frac{(X - X_e)}{(X_i - X_e)} \quad (1)$$

Em que: X - teor de água do produto, decimal b.s.; X<sub>i</sub> - teor de água inicial do produto, decimal b.s.; X<sub>e</sub> - teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

A partir do RX de cada condição de secagem, realizou-se o ajuste dos modelos matemáticos de regressão não-linear aos dados experimentais obtidos.

Tabela 1. Modelos de regressão não-linear utilizados para prever o fenômeno de secagem das fatias de banana maçã tropical ajustado aos dados experimentais de razão do teor de água

Designação do modelo	Modelo	Nº
Aproximação da Difusão	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k b t)$	(2)
Dois Termos	$RX = a \exp(-k t) + b \exp(-k_1 t)$	(3)
Exponencial de Dois Termos	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k a t)$	(4)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k t)$	(5)
Henderson e Pabis Modificado	$RX = a \exp(-k t) + b \exp(-k_1 t) + c \exp(-k_2 t)$	(6)
Logarítmico	$RX = a \exp(-k t) + b$	(7)
Midili	$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	(8)



Midili Modificado	$RX=\exp(-k t^n)+a t$	(9)
Newton	$RX=\exp(-k t)$	(10)
Page	$RX=\exp(-k t^n)$	(11)
Page Modificado	$RX=\exp(-(k t^n))$	(12)

Em que: RX - razão do teor de água do produto (adimensional); t - período de secagem, horas; k, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>- coeficiente de secagem; a, b, c e n - constantes empíricas dos modelos.

Na seleção dos melhores modelos, para representar a cinética de secagem das polpas de bananas maçã tropical em formato *chips*, foram considerados a significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando nível de 5% de probabilidade, a magnitude do coeficiente de determinação ajustado pelo modelo (R<sup>2</sup>), o erro médio estimado (SE) (equação 13), o erro médio estimado (P) (equação 14) e a distribuição dos resíduos. Para a recomendação do modelo matemático de cinética de secagem, foi verificado o R<sup>2</sup> mais próximo à unidade, valor de SE mais reduzido, valores de P menores que 10% e distribuição aleatório dos resíduos. A análise do comportamento dos resíduos gerado pelo modelo foi considerada aleatória quando os valores residuais se encontram em uma zona horizontal próximo de zero (Corrêa et al., 2014).

$$SE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y-\hat{Y})^2}{GLR}} \quad (13)$$

$$P=\frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y-\hat{Y}|}{Y} \right) \quad (14)$$

Em que: SE – erro médio estimado; n – número de casos; Y – valor experimental;  $\hat{Y}$  – valor estimado; GLR – grau de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

O coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ ) foi obtido pelo ajuste do modelo da difusão líquida para forma geométrica de placa plana aos dados experimentais da secagem, com a aproximação de 8 termos. A espessura e o diâmetro das polpas de banana maçã tropical em formato *chips* foram mensuradas utilizando-se um paquímetro digital para obtenção de uma média para uso no modelo.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ -\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4 \left(\frac{S}{V}\right)^2} \right] \quad (15)$$

Em que: RX – razão de água, adimensional; X – teor de água do grão, b.s.;  $X_i$  – teor de água inicial do grão, b.s.;  $X_e$  – teor de água de equilíbrio do grão, b.s.;  $D_{ef}$  – coeficiente de difusão efetivo,  $m^2s^{-1}$ ; n – número de casos (termos); t – tempo, s.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ ) e a temperatura do ar de secagem foi realizado pelo modelo de Arrhenius (equação 16).

$$D_{ef} = D_0 \exp \left[ -\frac{E_a}{R T_a} \right] \quad (16)$$

Em que:  $D_0$  – fator pré-exponencial,  $m^2s^{-1}$ ;  $E_a$  – energia de ativação,  $J mol^{-1}$ ; R – constante universal dos gases,  $8,314 J (mol K)^{-1}$ ;  $T_a$  – temperatura absoluta, k.

As propriedades termodinâmicas entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, relacionadas ao processo de secagem das fatias de banana maçã tropical, foram determinadas através do método descrito por Jideani & Mpotokwana (2009).

$$\Delta H = E_a - R T_a \quad (17)$$

$$\Delta S = R \left[ \ln(D_0) - \ln\left(\frac{k_B}{h_p}\right) - \ln(T_a) \right] \quad (18)$$

$$\Delta G = \Delta H - T_a \Delta S \quad (19)$$

Em que:  $\Delta H$  – entalpia,  $J \text{ mol}^{-1}$ ;  $\Delta S$  – entropia,  $J \text{ mol}^{-1}$ ;  $k_B$  – constante de Boltzmann,  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ;  $h_p$  – constante de Planck,  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de água inicial das fatias de banana maçã tropical foi de 3,0 (b.s.) no qual foi reduzido para 0,92 (b.s.) no final do processo de secagem. As temperaturas para as condições bancada, sombra e sol, foram de  $28,5 \pm 1,01$ ;  $32,3 \pm 0,387$ ;  $42,8 \pm 4,83$ , respectivamente. O tempo de secagem foi de nove horas para todas as condições de secagem. Como esperado, o tempo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura (Figura 1), situação também observada por Leite et al. (2015), que realizaram a cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra, nas temperaturas do ar de secagem de 40, 50 e 60 °C. De acordo com Goneli et al. (2014), a redução do tempo de secagem com o aumento da temperatura pode ser explicada devido ao aumento do gradiente de pressão de vapor entre o ar de secagem e o ar no interior do fruto.

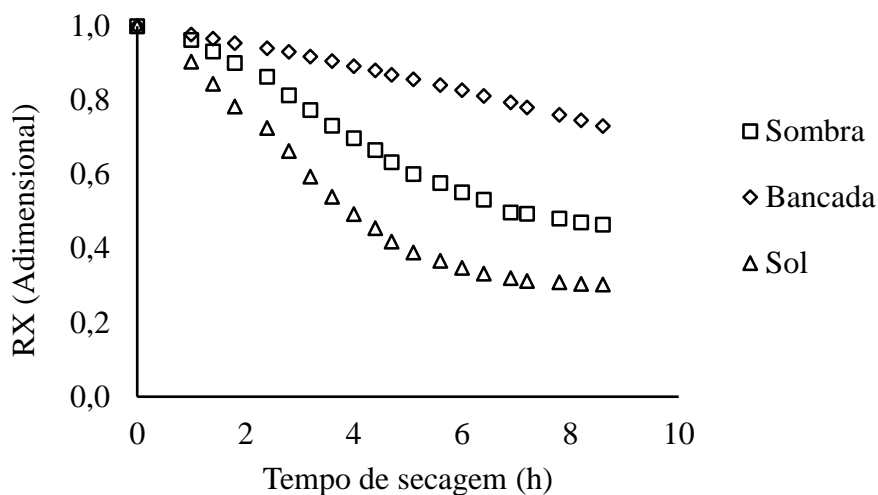


Figura 1. Valores médios da razão do teor de água (RX) de fatias de banana maçã tropical (decimal) em função do tempo de secagem (horas) em três condições de secagem (sombra, meia-sombra e sol)

Nas Tabelas 2 são apresentados os parâmetros estatísticos usados para comparar os 10 modelos testados para descrever a cinética de secagem de fatias de banana maçã tropical. Para as três condições, os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superior a 95%. Contudo, os modelos de Midilli e Midilli Modificado obtiveram os maiores valores de  $R^2$ , no qual os valores foram superiores a 98%. Segundo Karizaki (2016), valores mais altos de  $R^2$  indicam que o modelo teve bom ajuste aos dados experimentais. Todavia, o uso isolado deste parâmetro não é suficiente para caracterizar ajuste adequado de modelos não lineares (Corrêa et al., 2015), sendo necessário realizar uma análise aprimorada com outros parâmetros estatísticos (Zeymer et al., 2017). Logo, os valores obtidos do erro médio estimado (SE) e erro médio relativo (P) foram considerados.

Verifica-se, ainda na Tabela 2, que o modelo Newton foi o que apresentou maiores valores de P e SE e, conseqüentemente, não é recomendado. Já os modelos Midilli e Midilli

Modificado foram os que mostraram para todas as condições de secagem, menores valores de SE e P. De acordo com Siqueira et al. (2012), quanto menores os valores de SE melhor o ajuste do modelo aos dados observados enquanto Goneli et al., (2014) recomendam a análise conjunta de todas as temperaturas envolvidas no processo de secagem com erro médio relativo inferior a 10%.

Em relação a distribuição de resíduos constata-se que Midilli e Midilli Modificado apresentaram distribuição aleatória para as três condições de secagem, demonstrando assim, adequados para descrever a secagem das fatias de banana maçã tropical (Tabela 2). Segundo Goneli et al., (2009), um modelo matemático deve apresentar distribuição aleatória para representar o processo de secagem de forma adequada, ou seja, se os valores dos resíduos se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero.

Tabela 2. Valores dos coeficientes de determinação ajustados ( $R^2$ ), dos erros médios estimados (SE), dos erros médios relativo (P) e distribuição de resíduos (Dist) para os modelos matemáticos avaliados

Modelo matemático	Condições de secagem	( $R^2$ )	SE	P	Dist
Aproximação por difusão	Bancada	99,60	0,034	0,457	**A
	Sombra	96,23	0,262	4,619	*T
	Sol	97,46	0,254	5,686	A
Dois termos	Bancada	98,74	0,063	0,823	T
	Sombra	97,70	0,188	3,578	T
	Sol	97,32	0,254	7,176	T

Exponencial de dois termos	Bancada	99,59	0,035	0,461	A
	Sombra	96,87	0,232	4,249	A
	Sol	96,79	0,298	7,636	T
Henderson e Pabis	Bancada	98,24	0,076	0,994	T
	Sombra	96,97	0,234	4,108	T
	Sol	97,09	0,288	7,449	T
Logarítmo	Bancada	99,07	0,052	0,671	T
	Sombra	96,99	0,234	4,129	T
	Sol	97,42	0,272	6,515	T
Newton	Bancada	96,85	0,108	1,416	T
	Sombra	95,53	0,285	4,828	T
	Sol	96,78	0,300	7,507	T
Midilli	Bancada	99,62	0,032	0,425	A
	Sombra	98,44	0,153	2,912	A
	Sol	99,18	0,145	3,663	A
Midilli Modificado	Bancada	99,62	0,032	0,424	A
	Sombra	98,43	0,153	2,907	A
	Sol	99,18	0,144	3,653	A
Page Modificado	Bancada	99,53	0,039	0,507	A
	Sombra	97,03	0,227	4,153	T
	Sol	96,91	0,289	7,605	T
Page	Bancada	99,53	0,039	0,507	A
	Sombra	97,03	0,227	4,153	T
	Sol	96,91	0,289	7,605	T

\*T-Comportamento tendenciosa a distribuição dos resíduos; \*\*A-Comportamento aleatório da distribuição dos resíduos.

Portanto, ambos os modelos, Midilli e Midilli Modificado são recomendados para representar a cinética de secagem das fatias de banana maçã tropical. No entanto, por apresentar menos valores de P em relação a Midilli, o modelo Midilli Modificado foi escolhido.

Na Tabela 3 encontram-se os valores dos coeficientes do modelo Midilli Modificado para as diferentes situações de secagem. Constata-se que o coeficiente “k” aumentou com o aumento da temperatura enquanto que o coeficiente “n” reduziu. Já o coeficiente “a” não apresentou tendência de comportamento. Todos os coeficientes foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste t. De acordo com Babalis & Belessiotis (2004), o coeficiente (k), que representa as condições externas de secagem, pode ser utilizado como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionado com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente e à difusão líquida que controla o processo.

Tabela 3. Coeficientes do modelo Midilli Modificado para as diferentes situações de de secagem de fatias de banana maçã tropical

Condições de Secagem	Coeficientes do modelo Midilli Modificado		
	k	n	a
Bancada (28,5 ±1,01°C)	0,0016*	1,8503*	-0,0215*
Sombra (32,3±0,387°C)	0,0715*	1,5365*	0,0373*
Sol (42,8±4,83°C)	0,1249*	1,4842*	0,0298*

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t. a, n, e k – coeficientes de ajuste do modelos de Midilli Modificado.

Na Figura 2 verifica-se as curvas de secagem obtidas a partir do modelo Midilli Modificado para as diferentes condições de secagem estudadas. Constata-se que o modelo Midilli Modificado foi capaz de simular as diferentes condições de secagem de forma satisfatória, adequando-se bem aos dados experimentais. De acordo com Goneli et al. (2014) o melhor ajuste do modelo de Midilli aos dados experimentais de secagem está ligado, provavelmente, à rápida perda de água nos estádios iniciais do processo gerando uma curva de secagem mais acintosa e mais bem caracterizada matematicamente, por este modelo. Este fato pode ser atribuído a produtos com elevados teores de água como é o caso das frutíferas.

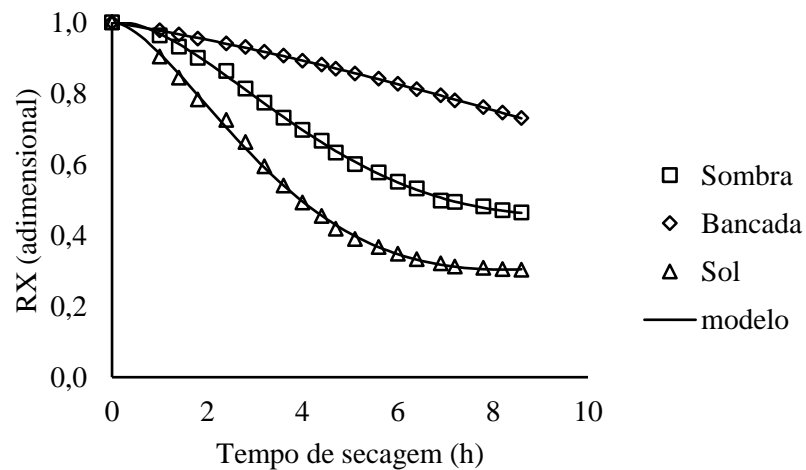


Figura 2. Curva de secagem de fatias de banana maçã tropical ajustadas ao modelo de Midilli Modificado submetidas a diferentes situações de secagem



Na Figura 3 verifica-se os valores médios do coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ ) em  $m^2 s^{-1}$  para as fatias de banana maçã tropical para as três condições de secagem estudadas. Observa-se que durante a secagem, o  $D_{ef}$  para as fatias de banana maçã tropical aumentou, com a elevação da temperatura, apresentando valores de  $2,80 \cdot 10^{-11}$ ;  $1,61 \cdot 10^{-10}$ ;  $3,53 \cdot 10^{-10} m^2 s^{-1}$  para bancada, sombra e sol, respectivamente. Os resultados apresentados são coerentes com Jangam et al. (2010), onde os produtos agrícolas geralmente apresentam valores de  $D_{ef}$  entre  $10^{-13}$  a  $10^{-7}$ . Ainda Jangam et al. (2010), cita que os valores da Difusividade para banana, nas temperaturas de 20 a 40°C, variam de  $3,0 \cdot 10^{-13}$  a  $2,1 \cdot 10^{-10} m^2 s^{-1}$ . Outros autores, como Leite et al. (2015), que trabalharam com fatias de banana variedade Terra, encontraram valores semelhantes com o presente trabalho, variando de  $5,64 \cdot 10^{-10}$  a  $9,86 \cdot 10^{-10}$ , na faixa de temperatura de 40 a 60 °C.

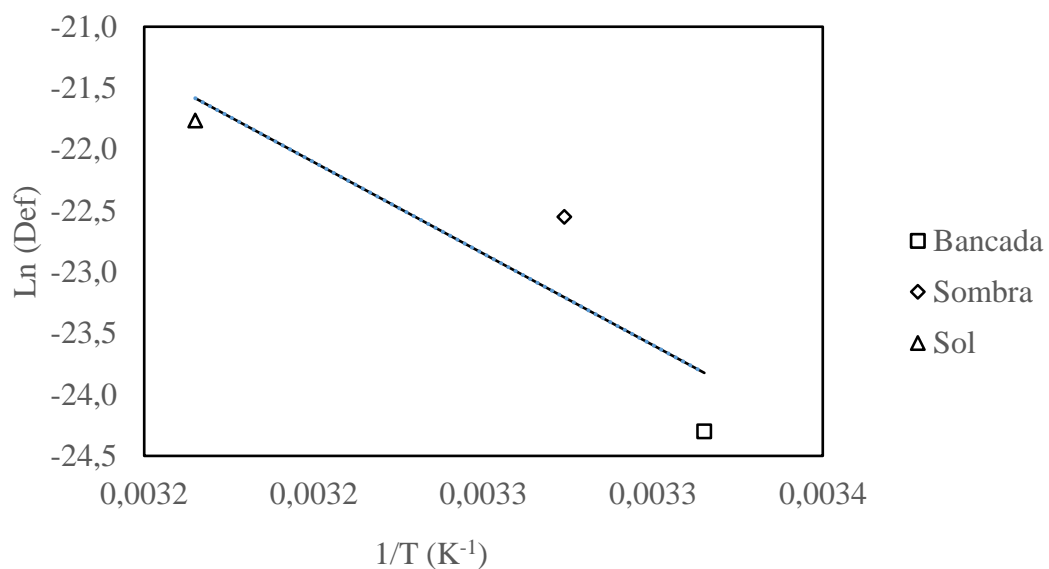


Figura 3. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar, durante a secagem de fatias de banana maçã tropical

A energia de ativação ( $E_a$ ), para o modelo da difusão líquida das fatias de banana maçã tropical, foi de  $85,266 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Corrêa et al. (2007) afirmaram, que a  $E_a$  consiste na facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto, sendo que: quanto menor a  $E_a$  maior será a difusividade da água no produto durante o processo de secagem. Leite et al. (2015) encontraram valores de  $24,07 \text{ kJ mol}^{-1}$ , para banana variedade terra, nas temperaturas de 40 a  $60^\circ\text{C}$ . Os valores encontrados no presente estudo diferem deste possivelmente pelas diferentes condições de secagem. Leite et al. (2015) utilizaram secador descontínuo de bandejas, com temperaturas do ar de secagem de  $40^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$  e velocidade de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , diferenciando do presente trabalho na qual a secagem foi feita em ambiente natural.

Na Tabela 4, verifica-se as propriedades termodinâmicas para as fatias de banana maçã tropical nas situações de secagem estudada. Verifica-se que a entalpia reduziu com o aumento da temperatura. Os menores valores de entalpia indicam menor energia necessária para remover a água ligada ao produto durante a secagem (Oliveira et al., 2010). O presente trabalho apresentou, como esperado, menor valor de entalpia para temperaturas mais elevadas de secagem, indicando que menor quantidade de energia é requerida para que a secagem ocorra em temperaturas mais altas. Os valores de entalpia para processo de secagem de fatias de banana maçã tropical foram de  $82,7535$ ;  $82,7219$ ; e  $82,6346 \text{ kJ mol}^{-1}$  para as situações de secagem bancada, sombra e sol, respectivamente.

Para entropia, os valores encontrados foram de  $-0,1560$ ;  $-0,1561$ ; e  $-0,1564 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , para bancada, sombra e sol, respectivamente (Tabela 4). Verifica-se que a entropia diminuiu com o aumento da temperatura. Rodríguez-Bernal et al. (2015) encontraram valores de entropia entre  $-0,1500$  e  $-0,0300 \text{ kJ mol}^{-1}$  para a adsorção de água pela polpa de borojó (*Alibertia patinoi*).

Em estudo Jideane e Mptokawana (2009), observou que a entropia tende a reduzir, com o aumento da temperatura. Este processo está associado ao caso de que, quando a temperatura diminui, ocorre menor excitação das moléculas de água, assim aumentando o grau de ordem entre o sistema água e fruto.

Ainda na Tabela 4, nota-se que os valores da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) aumentaram (129,8949; 130,4879 e 132,1284  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), com a elevação da temperatura (bancada, sombra e sol), respectivamente. Dessa forma, conclui-se que o processo de secagem não foi espontâneo, sendo necessária a adição de uma energia proveniente do ar nas fatias do fruto envolvido, para que ocorresse a redução do teor de água.

Tabela 4. Propriedades termodinâmicas do processo de secagem de fatias de banana maçã tropical: entalpia específica ( $\Delta H$ ), entropia específica ( $\Delta S$ ) e energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ )

Condições de				
Secagem	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta H$ ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$\Delta G$ ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	( $\Delta S$ ) ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
Bancada	28,5 $\pm$ 1,01	82,7535	129,8949	-0,1560
Sombra	32,3 $\pm$ 0,387	82,7219	130,4879	-0,1561
Sol	42,8 $\pm$ 4,83	82,6346	132,1284	-0,1564

## CONCLUSÕES

O modelo Midilli Modificado é recomendado para representar a cinética de secagem de fatias de banana maçã tropical nas condições de secagem estudadas.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem; esta relação pode ser descrita pela equação de Arrhenius.

A energia livre de Gibbs aumenta com o incremento da temperatura enquanto a entalpia e a entropia decrescem.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal Goiano Campus Ceres, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte e apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

ASABE. *Moisture Measurement* – Forages: Standard S358.2 DEC1988, R2008. In: American Society of Agricultural And Biological Engineers (Ed.). Standards, Engineering Practices, and Data. St. Joseph: ASABE, 2010. p.684-685.

Babalís, S.J.; Belessiotis, V.G. *Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs*. Journal of Food Engineering, v.65, n.3, p.449-458, 2004.

Celestino, S. M. C. *Princípios de secagem de Alimentos*. Planaltina-DF: EMBRAPA Cerrados, 2010. 51 p.

Corrêa, P. C.; Botelho, F. M.; Botelho, S. D. C.C.; Goneli, A.L.D. *Isotermas de sorção de água de frutos de Coffea canephora*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, [s.l.], v. 18, n. 10, p.1047-1052, out. 2014.

Corrêa, P. C.; Oliveira, G. H. H.; Botelho, F. M.; Goneli, A. L. D.; Carvalho, F. M. *Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem*. Revista Ceres, Viçosa, v. 57, n. 5, p.595-601, nov. 2010.

Corrêa, P. C.; Reis, M. F. T.; Oliveira, G. H. H. De; Oliveira, A. P. L. R. De; Botelho, F. M. *Moisture desorption isotherms of cucumber seeds: modeling and thermodynamic properties*. Journal of Seed Science, v.37, p.218-225, 2015.

Corrêa, P. C.; Resende, O.; Martinazzo, A. P.; Goneli A. L. D.; Botelho, F. M. *Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (Phaseolus vulgaris L.) em camadas delgadas*. Engenharia Agrícola, v.27, p.501-510, 2007.

Deamici, K. M.; Oliveira, L. C. D; Rosa, G. S. D; Oliveira, E. G. D; *Drying kinetics of fermented grape pomace: Determination of moisture effective diffusivity*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 20, n. 8, p.763-768, ago. 2016.

EMBRAPA. *Base de Dados dos Produtos: Banana*. 2017. Disponível em: <[http://www.cnpmf.embrapa.br/Base\\_de\\_Dados/index\\_pdf/dados/brasil/banana/b1\\_banana.pdf](http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/banana/b1_banana.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2018.

Goneli, A. L. D.; Corrêa, P. C.; Afonso Júnior, P. C.; Oliveira, G. H. H. de. *Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada*. Revista Brasileira de Armazenamento, v. especial, p.64-73, 2009.

Goneli, A. L. D.; Vieira, M. C.; Vilhasanti, H. DA C. B.; Gonçalves, A. A. *Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem*. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.44, p.56-64, 2014.

Gouveia, J. P. G. D.; Nascimento, J. D.; Almeida, ; F. D. A. C.; Silva, M. M. D.; Farias, E. D. S.; Silva, F.L.H.D. *Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de dessecção da polpa de banana da variedade prata*. Engenharia Agrícola, Jaboticabal,, v. 24, n. 3, p.799-806, dez. 2004.

Jangam, Sachin V.; LAW, Chung Lim; MUJUMDAR, Arun S.. *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. Singapore: National University Of Singapore, 2010. 1 v.

Jideani V. A. & Mpotokwana S. M. *Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation*. Journal of Food Engineering, 92:182–188, 2009.

Karizaki, V. M. *Kinetic modeling and determination of mass transfer parameters during cooking of rice*. Innovative Food Science and Emerging Technologies, v. 38, p. 131-138, 2016.

Kim, H.; Kim, J. *Kinetics and thermodynamics of microwave-assisted drying of paclitaxel for removal of residual methylene chloride*. Process Biochemistry, v. 56, p. 163-170, 2017.

Leite, A. L. M. P.; Silva, F. S. Da; Porto, A. G. Piasson, D.; Santos, P. D. *Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra*. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 45, n. 2, p.155-162, jun. 2015.

Morais, S. J. S.; Devilla, I. A.; Ferreira, D. A.; Teixeira, I. R. *Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp)*. Revista Ciência Agronômica, v. 44, n. 3, p.455-463, 2013.

Oliveira G.H.H., Corrêa P.C., Araújo E.F., Valente D.S.M. & Botelho F.M. *Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (Zea mays L.)*. International Journal of Food Science & Technology, 45:546-554, 2010.

Radünz, L.L.; Amaral, A. S. D.; Mossi, A. J.; Melo, E. D.; C.; Rocha, R. P. *Avaliação da cinética de secagem de carqueja*. Engenharia na agricultura, v.19, n.1, p.19–27, 2011.

Rodríguez-Bernal, J. M.; Flores-Andrade, E.; Lizarazo-Morales, C.; Bonilla, E.; Pascual-Pineda, L. A.; Gutierréz-López, G.; Quintanilla-Carvajal, M. X. *Moisture adsorption isotherms of the borjón fruit (Borojoa patinoi. Cuatrecasas) and gum arabic powders*. Food and Bioproducts Processing, Rugby, v. 94, p. 187-198, 2015.

Siqueira, Valdiney Cambuy; Resende, Osvaldo; Chaves, Tarcísio Honório. *Drying kinetics of jatropa seeds*. Revista Ceres, [s.l.], v. 59, n. 2, p.171-177, abr. 2012.

Sousa F.C., Martins J.J.A., Rocha A.P.T., Gomes J.P., Pessoa T., Martins J.N. *Predição de modelos sobre a cinética de secagem de folhas de Ziziphus joazeiro* Mart. Revista Brasileira de Plantas Mediciniais, [s.l.], v. 17, n. 2, p.195-200, jun. 2015.

Viganó, J.; Azuara, E.; Telis, V. R. N.; Beristain, C. I.; Jiménez, M.; Telis-Romero, J. *Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods*. Thermochemica Acta, v. 528, p. 63-71, 2012.

Zeymer, J. S.; Corrêa, P. C.; Oliveira, G. H. H. De; Baptestini, F. M.; Freitas, R. C. P. *Desorption isotherms of Lactuca sativa seeds*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.21, p.568-572, 2017.