RGe ISSN: 2177-3246

CINÉTICA DE SECAGEM DA CASCA DO CAJUEIRO: MODELAGEM MATEMÁTICA E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

DRYING KINETICS OF CASHEW TREE BARK – Anacardium occidentale L.: MATHEMATICAL MODELING AND THERMODYNAMIC PROPERTIES

CINÉTICA DE SECADO DE LA CORTEZA DE ANACARDO: MODELADO MATEMÁTICO Y PROPIEDADES TERMODINÁMICAS.

10.56238/revgeov17n5-131

Welington Bezerra de Sousa
Professor Doutor da EBTT lotado ETSC/CFP/UFCG
E-mail: welington.bezerra@professor.ufcg.edu.br

Ana Paula Trindade Rocha
Professora Doutora do MS lotada na UAEAL/CCT/UFCG
E-mail: anapaula.trindade@professor.ufcg.edu.br

RESUMO
O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) tem um impacto cultural e socioeconômico muito grande em áreas tropicais como Norte e Nordeste do Brasil devido ao seu fruto, pseudofruto e por possuir propriedades químicas e biológicas como antioxidantes, propriedades anti-inflamatórias, antifúngicas, dentre outras presente nesta espécie. O presente trabalho teve como objetivo estudar a cinética de secagem da casca do cajueiro, bem como aplicar modelos matemáticos, observando assim o comportamento das mesmas. Além de calcular as principais propriedades termodinâmicas tais quais: difusividade efetiva, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs. Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) e Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN). As cascas do cajueiro foram secas em três diferentes temperaturas (50, 60 e 70 ºC) de ar de secagem em um secador convectivo com velocidade de ar fixa de 1m/s. O modelo matemático Aproximação por Difusão foi o que mais se adequou aos dados da cinética de secagem da casca do cajueiro, apresentando altos valores para o coeficiente de determinação ($R^2 > 0,99$). A difusividade efetiva variou de $8,89\times10^{-10} m^2s^{-1}$ a $1,53\times10^{-9} m^2s^{-1}$, a energia de ativação obteve um valor de 25,1041 $kJmol^{-1}$. A variação da energia livre de Gibbs aumentou com o aumento da temperatura e foi considerada um processo não espontâneo, enquanto a entalpia e a entropia diminuíram.

Palavras-chave: Cinética de Secagem. Aproximação por Difusão. Propriedades Termodinâmicas.

ABSTRACT
The cashew tree (*Anacardium occidentale* L.) has a very large cultural and socioeconomic impact in tropical areas such as the North and Northeast of Brazil due to its fruit, pseudofruit and for having chemical and biological properties such as antioxidants, anti-inflammatory and antifungal properties, among others. present in this species. The present work aimed to study the drying kinetics of the cashew bark, as well as to apply mathematical models, thus observing their behavior. In addition to

calculating the main thermodynamic properties such as: effective diffusivity, enthalpy, entropy and Gibbs free energy. The experimental tests were carried out at the Laboratory of Storage and Processing of Agricultural Products (LAPPA), Laboratory of Food Engineering (LEA) and Laboratory of Renewable Energy Sources (LABFREN). The cashew husks were dried at three different temperatures (50, 60 and 70 ºC) of drying air in a convective dryer with a fixed air speed of 1m/s. The Diffusion Approximation mathematical model was the one that most suited the data on the drying kinetics of the cashew peel, presenting high values for the coefficient of determination ($R^2 > 0.99$). The effective diffusivity ranged from $8,89\times10^{-10}m^2s^{-1}$ a $1,53\times10^{-9}m^2s^{-1}$, the activation energy obtained a value of 25.1041 $kJmol^{-1}$. The change in Gibbs free energy increased with increasing temperature and was considered a non-spontaneous process, while enthalpy and entropy decreased.

Keywords: Drying Kinetics. Diffusion Approximation. Thermodynamic Properties.

RESUMEN

El árbol de anacardo (*Anacardium occidentale* L.) tiene un gran impacto cultural y socioeconómico en zonas tropicales como el norte y noreste de Brasil debido a su fruto, pseudofruto y propiedades químicas y biológicas, tales como antioxidantes, antiinflamatorias y antifúngicas, entre otras presentes en esta especie. Este trabajo tuvo como objetivo estudiar la cinética de secado de la corteza de anacardo, así como aplicar modelos matemáticos para observar su comportamiento. Además, se calcularon las principales propiedades termodinámicas, tales como la difusividad efectiva, la entalpía, la entropía y la energía libre de Gibbs. Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Almacenamiento y Procesamiento de Productos Agrícolas (LAPPA), el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos (LEA) y el Laboratorio de Fuentes de Energía Renovables (LABFREN). Las cortezas de anacardo se secaron a tres temperaturas diferentes (50, 60 y 70 °C) de aire de secado en un secador convectivo con una velocidad de aire fija de 1 m/s. El modelo matemático de aproximación por difusión se ajustó mejor a los datos de cinética de secado de la corteza de anacardo, mostrando altos valores para el coeficiente de determinación ($R^2 > 0,99$). La difusividad efectiva varió de $8,89 \times 10^{-10}$ $m^2\ s^{-1}$ a $1,53 \times 10^{-9}\ m^2\ s^{-1}$, y la energía de activación alcanzó un valor de 25,1041 kJ mol^{-1}. La variación de la energía libre de Gibbs aumentó con el incremento de la temperatura y se consideró un proceso no espontáneo, mientras que la entalpía y la entropía disminuyeron.

Palabras clave: Cinética de Secado. Aproximación por Difusión. Propiedades Termodinámicas.

1 INTRODUÇÃO

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) é um vegetal nativo do Brasil, encontrado em abundância principalmente na Região Nordeste, podendo chegar até 10m de altura e possuindo uma copa larga, e seu tronco, em geral, é ramificado e tortuoso, e dependendo da época as suas folhas podem variar entre as cores verdes ou róseas. É reconhecida por sua alta importância socioeconômica e cultural na região, sendo a exportação do seu fruto responsável por 99,7% das exportações da amêndoa de castanha de caju, o que é o seu principal produto (Brainer; Vidal, 2018).

Diversos estudos científicos apresentam inúmeras atividades biológicas comprovadamente do cajueiro, compostos que podem ser usados em fármacos a fim de apresentar propriedades desejáveis para novas formulações, tais atividades biológicas se encontram presentes nas folhas, frutos, casca do caule e flores, atividades essas que podem ser de ação anti-inflamatória e cicatrizante (Vasconcelos, 2011), antifúngica (Silva *et al*., 2012), atividade antimicrobiana de largo espectro (verificada em *Proteus morganii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Salmonella typhi*) (Silva, 2012; Chaves *et al*., 2010, Araujo *et al*., 2016) antioxidante (Santos *et al*., 2012) entre outras.

As tecnologias de secagem são operações unitárias muito significativas para a redução do teor de umidade e muito utilizadas na indústria alimentícia. Os produtos finais são normalmente na forma de pó, flocos, grânulos, folhas ou partículas em uma variedade de formas, dependendo dos requisitos do fabricante e do tipo de tecnologia de secagem utilizada no processo. Esses processos geralmente facilitam o armazenamento a longo prazo, evitam a contaminação microbiológica e outras reações químicas nocivas em materiais alimentícios, como extração de nutrientes enzimáticos e não enzimáticos e retenção de nutrientes, como os macronutrientes (proteínas, carboidratos, fibras, vitaminas e minerais). ou compostos bioativos (compostos fenólicos, carotenóides, isoflavonas) (Menon *et al*., 2020).

A determinação das propriedades termodinâmicas é importante para viabilizar a compreensão do processo, como, por exemplo, a variação de entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG). A variação de entalpia mensura a diferença de energia na interação das moléculas de água com o produto durante o processo (Silva *et al*., 2019). A variação de entropia está associada com o grau de desordem do sistema, é uma função de estado que tende a aumentar em sistema isolado. Além disso, a entropia pode estar relacionada com a ligação ou a repulsão das forças no sistema, e com o arranjo espacial água-produto. A energia livre de Gibbs é a energia necessária para realizar a transferência das moléculas de água presente no produto para o ar, ou seja, é o trabalho realizado pelo sistema para realizar o processo de sorção (Corrêa *et al*., 2017). Neste sentido torna-se necessária a obtenção de informações teóricas sobre o comportamento de cada produto durante a secagem. Essas informações

podem ser obtidas através de simulações de secagem, utilizando os modelos matemáticos para descrever o processo de perda de água (Gomes *et al*., 2017).

Desta forma, o objetivo desse trabalho é de estudar a cinética de secagem da casca do cajueiro, bem como aplicar modelos matemáticos, observando assim o comportamento das mesmas. Além de calcular as principais propriedades termodinâmicas tais quais: difusividade efetiva, entalpia, entropia e energia livre de Gibbs.

2 MATERIAIS E MÈTODOS

2.1 MATERIAIS

Foram utilizadas cascas do cajueiro extraídas de árvores na cidade de Cajazeiras-Paraíba. O material vegetal foi transportado em caixas térmicas ao Laboratório de Engenharia de Alimentos na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus Campina Grande, onde foram realizados os experimentos.

As cascas do cajueiro foram recepcionadas, selecionadas e devidamente sanitizadas para eliminação de sujidades proveniente do transporte, e cortadas em pedaços de espessura igual ou inferior a 0,5cm para se dar início ao estudo, com o intuído de evitar quaisquer contaminação ou uso da mesma em má qualidade, para que se assim iniciasse o processo de secagem

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Cinética de secagem

As amostras, pesando 10g dispostas em bandejas confeccionadas com telas de alumínio, em triplicata, foram submetidas à secagem em estufa nas temperaturas de 50, 60, 70°C e velocidade do ar de 1 m/s. As cinéticas de secagem foram realizadas pesando-se as amostras em intervalos regulares de 5, 10, 15, 30 e 60 min, até atingirem o equilíbrio dinâmico com o ar de secagem. Foi determinado o teor de água das amostras com a pesagem do material antes da cinética, e em estufa a 105°C após 24 horas, sendo calculada a razão de umidade (Equação 1) e traçadas as curvas da razão do teor de água em função do tempo de secagem.

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

Em que:

RX - razão do teor de água do produto (adimensional);

X - teor de água do produto (b.s.);

X_i - teor de água inicial do produto (b.s.);

X_e - teor de água de equilíbrio do produto (b.s.).

Os modelos matemáticos descritos na Tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais das curvas de secagem através de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa Statistica 7.0.

Tabela 1 - Modelos matemáticos utilizados para ajustar os dados da cinética de secagem das cascas do cajueiro.

Modelo	Equação
Aproximação da difusão	$RX = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
Henderson e Pabis	$RX = a\exp(-kt)$
Lewis	$RX = \exp(-kt)$
Logarítmico	$RX = b\exp(-kt) + c$
Midilli Modificado	$RX = a\exp(-kt^c) + bt$
Page	$RX = \exp(-kt^n)$
Exponencial de dois termos	$RX = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
Parry	$RX = a\exp(-kt) + c$
Newton	$RX = \exp(-kt)$

Fonte: Autores.

A seleção do melhor modelo matemático foi dada através da avaliação do coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio - DQM (Equação 2) e o qui-quadrado - χ^2 (Equação 03). Sendo considerado como ajuste satisfatório o modelo que apresentou os maiores valores de R^2 e os menores valores de DQM e χ^2.

$$DQM = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(RX_{pred,i} - RX_{exp,i})^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n}\sum_{i=1}^{N}(RX_{exp,i} - RX_{pred,i})^2 \quad (3)$$

Em que:

DQM - desvio quadrático médio;

χ^2-qui-quadrado;

RX_{pred} - razão do teor de água predita pelo modelo;

RX_{exp} - razão do teor de água experimental;

N - número de observações.

n - número de constantes do modelo.

2.2.2 Difusividade efetiva

A difusividade efetiva teve seu cálculo obtido através da equação de difusão para sistema de coordenadas retangulares, como mostrado na Equação 4. Considerou-se uma distribuição de teor de

água inicial, uniforme e sem a presença de qualquer resistência térmica e a solução analítica da lei de Fick para uma placa plana infinita, foi estudada na forma de séries infinitas (Equação 05).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(Def\,\frac{\partial X}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(Def\,\frac{\partial Y}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{ef}\,\frac{\partial Z}{\partial z}\right) \quad (4)$$

$$RX = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)}\,exp\left[-(2n+1)^2\,\pi^2\,\frac{D_{ef}}{L^2}t\right] \quad (5)$$

Em que:

RX – razão do teor de água do produto (adimensional);
n - número de termos
D_{ef} – difusividade efetiva ($m^2\ s^{-1}$);
L– espessura da camada (m);
t – tempo (s).

A Equação 4 representa uma série de termos infinitos, tornando-se necessário o uso do software Statistica 7.0, para cálculo estatístico para a determinação da difusividade efetiva, por meio de regressão não-linear e método Quasi-Newton, com aproximação de 4 termos, a partir de onde não se observou haver mais variação do valor de D_{ef}.

Avaliou-se o efeito da temperatura de secagem na difusividade efetiva por meio da equação do tipo de Arrhenius (Equação 6), no qual descreve a relação entre a energia de ativação e a velocidade em que a reação ocorre.

$$D_{ef} = D_0\,exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

Em que:

D_{ef} - difusividade efetiva ($m^2\ s^{-1}$);
D_0 - fator pré-exponencial ($m^2\ s^{-1}$);
E_a - energia de ativação ($J\ mol^{-1}$);
R - constante universal dos gases, 8,314 $J\ mol^{-1}\ K^{-1}$;
T - temperatura (K).

2.2.3 Propriedades Termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas do processo de secagem (entalpia, entropia e energia livre de Gibbs) foram calculadas a partir das Equações 07, 08 e 09, respectivamente (Corrêa *et al*., 2012).

$$\Delta H = E_a - RT \tag{07}$$

$$\Delta S = R\left(\ln D_0 - \ln\frac{k_b}{hp} - \ln T\right) \tag{08}$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \tag{09}$$

Em que:

ΔH - variação de entalpia (J mol^{-1});
ΔS - variação de entropia (J mol^{-1} K^{-1});
ΔG - variação de energia livre de Gibbs (J mol^{-1});
E_a - energia de ativação (J mol^{-1});
R - constante universal dos gases, 8,314 J mol^{-1} K^{-1};
D_0 - fator pré-exponencial (m^2 s^{-1});
k_B - constante de Boltzmann, 1,38 × 10^{-23} (J K^{-1});
h_P - constante de Planck, 6,626 × 10^{-34} (J s);
T - temperatura (K)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores referentes aos tempos de secagem e umidade final das amostras da casca de cajueiro estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Teor de umidade e tempos de secagem das cascas de cajueiro em diferentes temperaturas.

Temperatura (ºC)	**Tempo de secagem (min)**	**Teor de umidade (%b.u.)**	**Teor de umidade (%b.s.)**
50	420	5,1766^{b} ± 0,167	5,4595^{b} ± 0,184
60	210	6,0253^{ab} ± 0,565	6,5541^{ab} ± 0,527
70	180	6,8403^{a} ± 0,202	7,5461^{a} ± 0,259

Fonte: Autores.

Nos experimentos, o tempo de secagem tendeu a diminuir com o aumento da temperatura e essa diminuição no tempo de secagem com o aumento na temperatura do ar de secagem foi relatada para muitos produtos agrícolas similares, como sementes e cascas de trapiá (Moura *et al*., 2021), cascas de kino (Barros *et al*., 2020), cascas do maracuká-amarelo (Martins *et al*., 2019).

As amostras da casca de cajueiro possuem um teor de umidade inicial médio de 56,5% b.u. e atingiu um teor de umidade médio final de 6,02% b.u., uma redução de cerca de 89% em relação ao

valor inicial. Martins *et al*. (2019) encontrou para as cascas de maracujá-amarelo uma redução de teor de água similar, cerca de 75 a 97% em relação ao valor inicial. De mesma forma Moura *et al*. (2021) encontrou uma redução de cerca de 89% em relação ao valor inicial.

Na Tabela 3 estão descritos os parâmetros dos modelos obtidos após o ajuste dos dados experimentais de secagem das amostras da casca de cajueiro nas temperaturas analisadas.

Tabela 3 - Os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados de secagem das cascas de cajueiro mais os coeficientes de determinação (R2), Desvio Quadrático Médio (DQM) e valores do qui-quadrado ($\chi 2$).

Modelo	T (°C)	Parâmetros			R^2	DQM	χ^2
		a	**k**	**b**			
Aproximação da difusão	50	-29,4564	0,3579	0,0514	99,984	0,0055	0,0002
	60	-39,9516	0,3685	0,0520	99,987	0,0021	0,0001
	70	-89,8857	0,4087	0,0573	99,915	0,0098	0,0001
		a		**k**			
Henderson e Pabis	50	0,9770		0,0188	99,947	0,0087	0,0006
	60	0,9861		0,0270	99,967	0,0049	0,0003
	70	0,9963		0,0322	99,892	0,0113	0,0001
			k				
Lewis	50		0,0194		99,889	0,0008	0,0001
	60		0,0275		99,945	0,0009	0,0005
	70		0,0324		99,989	0,0124	0,0001
		b	**k**	**c**			
Logarítmico	50	0,9734	0,01914	0,0056	99,957	0,0048	0,0001
	60	0,9837	0,02738	0,0039	99,971	0,0026	0,0001
	70	1,0019	0,03152	-0,0087	99,915	0,0047	0,0001
		k	**n**	**b**			
Midilli Modificado	50	0,0244	0,9411	0,000004	99,971	0,0024	0,0003
	60	0,0321	0,9567	-0,000003	99,987	0,0005	0,0001
	70	0,0308	1,0129	-0,000025	99,903	0,0065	0,0001
		k		**n**			
Page	50	0,0320		0,9576	99,987	0,0112	0,0001
	60	0,0304		1,0186	99,897	0,0118	0,0009
	70	0,0304		1,0186	99,897	0,0118	0,0001
		a		**k**			
Exponencial dos dois termos	50	0,0386		0,4772	99,983	0,0058	0,0001
	60	0,0151		1,6271	99,901	0,0031	0,0001
	70	0,0094		3,3961	99,893	0,0120	0,0001
		a	**k**	**c**			
Parry	50	0,9734	0,0191	0,0056	99,957	0,00001	0,0005
	60	0,9837	0,0273	0,0039	99,971	0,00003	0,0003
	70	1,0019	0,0315	-0,0086	99,915	0,00003	0,0009
			k				
Newton	50		0,0194		99,889	0,0008	0,0001
	60		0,0275		99,945	0,0009	0,0005
	70		0,0324		99,989	0,0004	0,0001

Fonte: Autores.

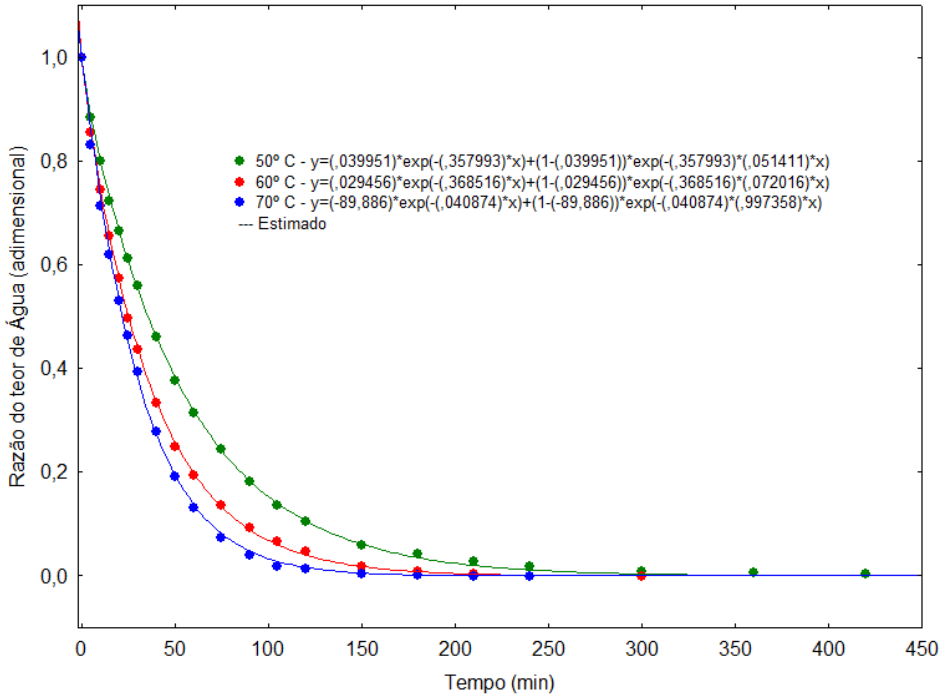
Pode-se observar que os dados experimentais obtidos a partir da cinética de secagem das amostras da casca foram ajustados satisfatoriamente por todos os modelos aplicados visto que os

mesmos se adequaram corretamente ao estudo de secagem, com coeficientes de determinação (R^2) que variaram de 99,984 a 99,882%, para as temperaturas de 50, 60 e 70ºC. Os baixos valores de DQM e qui-quadrado (χ^2) obtidos ratificaram o bom ajuste dos modelos matemáticos aplicados. Araújo *et al*. (2017), afirmam em seus estudos que valores de R^2 superiores a 98,0% indicam que os modelos matemáticos representam de maneira satisfatória o comportamento de secagem.

O parâmetro k (constante de secagem) de todos os modelos apresentados cresceram com o aumento da temperatura empregada na cinética. De acordo com Corrêa *et al*. (2012) o parâmetro "k" tende a aumentar visto que maiores temperaturas acarretam maiores taxas de secagem chegando ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de submissão do produto ao ar de secagem. Gomes *et al*. (2017) observaram que o aumento da temperatura no processo de secagem pode provocar a redução da viscosidade da água, indicando que a água encontrada no interior consegue migrar com maior facilidade quando comparada a menores temperaturas de secagem, fato evidenciado quando foi observado aumento nos valores do coeficiente k.

Na Figura 1 encontra-se os dados experimentais e preditos com ajustes pelo melhor modelo (Aproximação por difusão) das cascas do cajueiro, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C. Essas curvas são uma relação entre a razão do teor de água (adimensional) e o tempo de secagem (minutos). Pode-se observar que a temperatura teve influência sobre a secagem das amostras com as curvas em posições distantes umas das outras, havendo, no entanto, diferenças no tempo final de secagem, até que o equilíbrio fosse alcançado.

Figura 1: Gráfico do modelo matemático Aproximação por Difusão (50, 60 e 70º) sobre dados da cinética de secagem das cascas do cajueiro.



Fonte: Autores.

A difusividade efetiva (D_{ef}) é um dos índices mais essenciais para a avaliação da cinética de secagem de produtos agrícolas pois permite avaliar e comparar a velocidade de secagem e a dependência da temperatura (Botelho *et al*., 2018). Variações nessa propriedade resultam em alterações na difusão da água nos capilares dos produtos agrícolas, que em combinação com uma maior vibração das moléculas de água contribuem para uma difusão mais rápida (Goneli *et al*., 2014).

A Tabela 4 exibe os valores de difusividade efetiva para as temperaturas de 50, 60 e 70°C das amostras da casca do cajueiro.

Tabela 4 – Difusividade efetiva das amostras das cascas do cajueiro em diferentes temperaturas.

Temperatura (ºC)	**Difusividade efetiva (m^2s^{-1})**	**R^2**
50	8,892E-10	94,4286
60	1,280E-09	97,1485
70	1,530E-09	97,3349

Fonte: Autores.

Os valores de D_{ef} indicaram que o aumento da temperatura interfere fortemente no aumento da perda de água das cascas do cajueiro, reduzindo o tempo de secagem. Fenômeno esse observado também observado por Lima (2021) no qual percebeu que para as cascas de maracujá-amarelo esse mesmo processo é recorrente. Silva *et al*. (2017) explicam que este aumento do D_{ef} ocorre de acordo com a temperatura, concentração, vibração das moléculas de água e volume do produto.

Na medida em que, se aumenta o gradiente de temperatura, maior é o valor obtido para este parâmetro, pois em temperaturas inferiores, como a de 50°C, as moléculas de água sofrem maior resistência ao sair do corpo devido a sua composição e estrutura física, fazendo com que, a água seja mais ligada às moléculas que constituem a massa seca (Almeida *et al*., 2020).

Na Tabela 5 estão exibidos os parâmetros da equação de Arrhenius (ajustado aos dados de difusividade efetiva) das amostras da casca do cajueiro.

Tabela 5 - Parâmetros da equação de Arrhenius (ajustado aos dados de difusividade efetiva das amostras das cascas do cajueiro).

D_0 (m^2s^{-1})	**E_a ($kJmol^{-1}$)**	**R^2**
1,04E-5	25,1041	93,783

Fonte: Autores.

A energia de ativação (E_a) foi obtida pelo ajuste do modelo de Arrhenius e seu valor foi de 25,1041 $kJmol^{-1}$, conforme a Equação 6. Esse valor apresentou-se dentro do intervalo de 12,7 a 110 kJ mol-1 relatado por Zogzas *et al*. (1996) para produtos agrícolas. Esse valor foi inferior aos resultados apontados por Vasconcelos *et al*. (2019) em cascas de mangostão (64,8 $kJmol^{-1}$) e Souza *et al*. (2021) com cascas de tucumã (39,50 $kJmol^{-1}$), indicando que o processo de secagem das cascas do cajueiro demandou menor energia para que se iniciasse a difusividade da água.

Na Tabela 6 verifica-se as propriedades termodinâmicas, entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) para diferentes temperaturas das cascas do cajueiro.

Tabela 6 - Valores para as variações de entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG) para diferentes temperaturas das cascas do cajueiro.

Temperatura (°C)	**ΔH (kJmol^{-1}K^{-1})**	**ΔS (kJmol^{-1}K^{-1})**	**ΔG (kJmol^{-1}K^{-1})**
50	22,4174	-0,3409	132,5899
60	22,3343	-0,3412	136,0005
70	22,2511	-0,3414	139,4136

Fonte: Autores.

A entalpia (ΔH) reduziu de 22,4174 para 22,2511 kJmol^{-1} com o incremento da temperatura (50, 60 e 70°C). Este fato indica que é necessária uma quantidade menor de energia para que a secagem ocorra em temperaturas mais elevadas (Martins *et al*., 2019). Segundo Santos *et al*. (2019), os valores positivos encontrados para entalpia significam reações endergônicas, também se nota que com o aumento da temperatura, houve uma queda no valor da entalpia, Morais *et al*. (2019), justifica esse fato afirmando que para as secagens em temperaturas mais baixas necessariamente é desempenhada uma maior quantidade de energia. Já os valores de Entropia (ΔS) mostram que houve uma redução termodinâmica à medida que a temperatura aumentou, tal fato está ligado ao teor de água que vai gradativamente abaixando, diminuindo, e assim dificultando o movimento das moléculas de água. Santos et al. (2019) encontraram valores bem próximos ao analisarem o fruto acuri com valores compreendidos entre (-0,3747 e -0,3740). Os valores de ΔS negativos foram atribuídos à existência de adsorção química e/ou modificações estruturais do adsorvente (Goneli *et al*., 2014).

Apresentando valores positivos, com variação de 132,58 kJmol^{-1}K^{-1} a 139,41 kJmol^{-1}K^{-1}, para temperaturas de 50 e 70º, respectivamente, a energia livre de Gibbs (ΔG) demonstra ser um processo não espontâneo, já que essa variação presenta um aumento de energia no decorrer das temperaturas. Segundo Suassuna *et al*. (2017), esses valores representam uma reação exógena, reação essa que necessita de um agente externo doando energia para o ambiente para que se aconteça.

4 CONCLUSÃO

Diante dos dados obtidos na pesquisa, desde o tratamento das cascas do cajueiro ao momento de pesagem final da amostra seca, conclui-se que a cinética das cascas do cajueiro em um secador convectivo com velocidade de ar fixa, e o uso de planejamento fatorial foi realizada com êxito constando que os modelos matemáticos testados mostraram ajustes satisfatórios, nas temperaturas de 50, 60 e 70 ºC, aos dados experimentais com coeficientes de determinação (R^2) superior a 99%.

O modelo de Aproximação por Difusão foi o que melhor se ajustou a cinética de secagem da casca do cajueiro. A secagem apresentou uma energia de ativação de 25,1041kJ mol^{-1}.

ISSN: 2177-3246

As propriedades termodinâmicas também apresentaram valores satisfatório em relação a secagem, respondendo ao aumento de temperatura, tendo a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs indicando um processo não espontâneo. A variação da energia livre de Gibbs aumentou com o incremento da temperatura, enquanto que a entalpia e entropia diminuíram.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. L. J., SANTOS, N. C., PEREIRA, T. P., QUEIROGA, A. P. R., SILVA, V. M. A., RIBEIRO, V. H. A., BORGES, E. M. E. S. Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, 9(3), e27932316. 2020.

ARAUJO, E. R. D.; LANGASSNER, S. M. Z.; CAVALCANTI JUNIOR, G. B.; KRAMER, G. D. Antimicrobial potential evaluation of hydroethanolic extracts of the species *Anacardium occidentale* Linn. **African Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 10, n. 28, p. 579–583, 2016.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; FILHO, C. P.H.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.

BARROS, S. L.; CAMARA, G. B.; LEITE, D. D. F.; SANTOS, N. C.; SANTOS, F. S.; SOARES, T. C.; LIMA, A. R. N.; SOARES, T. C.; OLIVEIRA, M. N.; VASCONCELOS, U. A. A.; ALBUQUERQUE, A. P.; QUEIROZ, A. J. M. Modelagem matemática da cinética de secagem de cascas do kino (*Cucumis metuliferus*). **Research, Society and Development**, v. 9, n.1, e60911608, 2020.

BRAINER, M. S. C. P.; VIDAL, M. F**.** Cajucultura nordestina em recuperação. **Caderno Setorial ETENE**, v. 54, n. 3, p. 1–13, 2018.

BOTELHO, F. M. et al. Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. **Engenharia na Agricultura**, v.26, n.1, p. 13-25, 2018.

CHAVES ET AL. Fenóis totais, atividade antioxidante e constituintes químicos de extratos de Anacardium occidentale L., Anacardiaceae. **Revista Brasileira de Farmacognosia**. 2010; 20; 106-112 (1).

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**, v.57, n.5, p,595-601, 2012.

CORRÊA, P. C., Oliviera, G. H. H., Oliveira, A. P. L. R., Botelho, F. M., & Goneli, A. L. D.. Thermodynamic properties of drying process and water absorption of rice grains. **CYTA: Journal of Food**, *15*(2), 204-210. 2017.

GOMES, N. H. F.; Neto, H. C. S.; Alves, J. J. L.; Rodovalho, R. S. & Sousa, C. M. Cinética de secagem de folhas de Cymbopogon citratus. **Engevista**, v. 19, n. 2, p. 328-338. (2017).

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

LIMA, A. R. N. **Descrição do processo de secagem e caracterização físico-química de cascas de maracujá amarelo (*Passiflora edulis f. flavicarpa O. Deg.*)**. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais e Biotecnologia)Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, 2021.

MARTINS, H. F.; CARVALHO, S. S. R. A.; BISPO, J. A. C.; SOUZA, S. M. A.; MARTINEZ, E. A.; Maracujá-amarelo (Passiflora edulis f. Flavicarpa): cinética da secagem artificial e natural da casca. **Braz. J. of Develop**., Curitiba, v. 5, n. 10, p. 23234-23245, nov. 2019.

MENON, A.; STOJCESKA, V.; TASSOU, S. A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends Food Sci Technol** [Internet]. 100:67–76. 2020.

MORAIS, M. F., SANTOS, J. R. O., SANTOS, M. P., SANTOS, D. C., COSTA, T. N., & LIMA, J. B. (2019). Modeling and thermodynamic properties of 'bacaba' pulp drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 23(9), 702-708.

MOURA, H. V.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; SILVA, E. T. V.; ESMERO, J. A. D.; LISBÔA, J. F. Mathematical modeling and thermodynamic properties of the drying kinetics of trapiá residues. **J Food Process Eng**. e13768. 2021.

SANTOS, F. S.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. & SANTOS, D. C. (2017) - Drying kinetics and physical and chemical characterization of white-fleshed 'pitaya' peels. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 21, n. 12, p. 872-877.

SANTOS, D. C.; LEITE, D. D. F.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P. L.; SANTOS, F. S.; LIMA, T. L. B.; FIGUEIREDO, R. M. F.; COSTA, T. N. Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri. **Braz. J. Food Technol**., Campinas, v. 22, e2018031, 2019.

SANTOS, FO. Atividades Biológicas de Anacardium occidentale (Linn). Patos: Universidade Federal de Campina Grande, 2011**. Dissertação de Mestrado em Sistemas Agrossilvipastoris no Semi-árido.**

SILVA, N. C. B., SANTOS, S. G. F., SILVA, D. P., SILVA, I. L., RODOVALHO, R. S. Drying kinetics and thermodynamic properties of boldo leaves (*Plectranthus barbatus* Andrews). **Journal of Agrarian Sciences**, *47*(1), 1-7. 2019.

SILVA, RA. Ação antimicrobiana de Anacardium occidentale L.: potencial biotecnológico na geração de produtos anticárie. São Luís: Rede Nordeste de Biotecnologia – RENORBIO, 2012. **Tese de Doutorado em Biotecnologia.**

SILVA, F. P. da; SIQUEIRA, V. C.; MARTINS, E. A. S.; MIRANDA, F. M. N.; MELO, R. M. Thermodynamic properties and drying kinetics of Bauhinia forficata Link leaves. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.61-67, 2017.

SOUZA, T. T. C.; MONTEIRO, E. R.; RIBEIRO, C. T.; SOUZA, D. S.; SANTOS, T. T. Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem do epicarpo, mesocarpo e endocarpo do tucumã (*Astrocaryum aculeatum*). **Braz. J. Food Technol**., Campinas, v. 24, e2020032, 2021.

SUASSUNA, C. F.; FERREIRA, N. M.; SÁ, F. V. S.; BERTINO, A. M. P.; MESQUITA, E. F.; PAIVA, E. P.; JESUS, E. P.; BERTINO, A. M. P. Substratos e ambientes para produção de mudas de cajueiro anão precoce. **Agrarian, Dourados**, v. 9, n. 33, p. 197-209, 2017.

VASCONCELOS, G. N.; SANTANA, E. B.; NASCIMENTO, R. A.; ANDRADE, E. L.; CORUMBA, L. G.; FARIA, L. J. G.; COSTA, C. M. L. Avaliação da secagem da casca de mangostão (*Garcinia mangostana* L.) em diferentes ambientes. **Reserch Gate**. Estudos Interdisciplinares nas Ciências Exatas e da Terra e Engenharias 2. 2019.

VASCONCELOS, MS. Atividades antioxidante, anti-inflamatória e cicatrizante do caju (*Anacardium occidentale* L.). **Dissertação de mestrado em Bioquímica.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2011.

ZOGZAS, N. P., MAUROULIS, Z. B., & MARINOS, D. K. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, 14(10), 2225-2253.