

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE ESPINHEIRA-  
SANTA (*MAYTENUS ILICIFOLIA* (SCHRAD.) PLANCH))**

Camilo Odorico Alencar Araujo

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2016

**CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE ESPINHEIRA-  
SANTA (*Maytenus ilicifolia* (SCHRAD.) PLANCH))**

**CAMILO ODORICO ALENCAR ARAUJO**  
Engenheiro Agrícola

Orientador: PROF. Dr. VALDINEY CAMBUY SIQUEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal da Grande Dourados, como  
parte das exigências para conclusão do curso de  
Engenharia Agrícola.

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

A663c Araujo, Camilo Odorico Alencar  
Cinética de secagem de folhas de espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia* (Schrad.) Planch) / Camilo Odorico Alencar Araujo -- Dourados: UFGD, 2016.  
33f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Valdiney Cambuy Siqueira

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola) -Faculdade de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Modelo de Midilli. 2. Coeficiente de difusão. 3. Propriedades termodinâmicas. 4. Razão de umidade. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

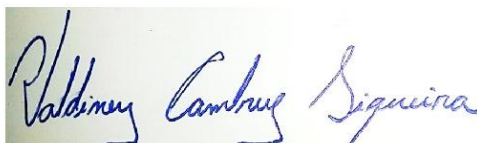
# CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE ESPINHEIRA-SANTA (*Maytenus ilicifolia* (SCHRAD.) PLANCH))

Por

CAMILO ODORICO ALENCAR ARAUJO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

Aprovado em: 07 de outubro de 2016.



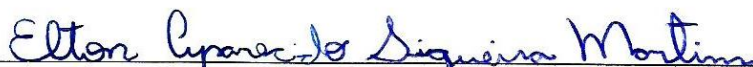
---

Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira  
Orientador – UFGD/FCA



---

Mestranda Maria Heloisa Junqueira  
Membro da Banca – UFGD/PPEA



---

Prof. Elton Aparecido Siqueira Martins  
Membro da Banca – UFGD/FCA

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela conquista concedida, por iluminar meus caminhos, guiar meus passos, amparar-me nos momentos difíceis que a vida me proporcionou e continuar me iluminando nessa caminhada da vida.

À UFGD, por ser responsável pela infraestrutura do curso de Engenharia Agrícola.

A minha mãe Sonia Maria Alencar que sempre esteve ao meu lado perante aos momentos bons e ruins que a vida me proporcionou. Obrigado pelo amor, carinho, compreensão, paciência e pelo incansável apoio e suporte para que esse sonho se realizasse.

A minha avó ( in memoriam ) Maria Cândida Alencar por ter sido meu alicerce durante o período da minha graduação .

A minha namorada Isabely Teixeira, por ter enfrentado comigo as dificuldades e as alegrias que me deparei durante essa trajetória, sendo companheira, paciente, amorosa e acima de tudo, por me incentivar a jamais desistir dos meus sonhos e objetivos.

A todos os meus familiares que me apoiaram durante a graduação.

Ao orientador e amigo Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira, pelos ensinamentos transmitidos, conselhos e confiança depositada em mim. Obrigado pela grande dedicação na condução dessa pesquisa.

A todos os professores do curso de Engenharia Agrícola, que transmitiram seus conhecimentos e experiências, servindo como base para que eu me torne um bom profissional.

A todos os amigos adquiridos na graduação Elton Bruno Giordano, Lucas Rocha, Paulo Sergio, Rogerio Alves de oliveira, Matheus Viana, Fernanda Pimentel e Wellyton Quequeto, pela amizade, apoio, companheirismo, e ajuda prestada no trabalho.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para realização desse trabalho.

**Obrigado**

## SUMÁRIO

RESUMO.....	v
INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 Espinheira Santa.....	3
2.2 Secagem .....	4
2.3 Propriedades Termodinâmicas.....	5
2.4 Modelagens Matemática.....	6
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	7
4.RESULTADO E DISCURSÃO.....	13
5.CONCLUSÃO.....	21
6.REFERÊNCIA.....	22

ODORICO, C. A. A. **Cinética de secagem de folhas de espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia* (Schrad.) Planch)**. 2016. 27p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

### RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho avaliar a cinética de secagem de folhas de espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia* (Schrad.) Planch) em camada delgada e ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais de razão de umidade. As folhas foram colhidas com teor de água inicial de  $1,80 \pm 0,10$  decimal b.s., sendo submetidas à secagem sob condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70 °C), até o teor de água de  $0,08 \pm 0,01$  decimal b.s.. Aos dados experimentais foram ajustados treze modelos matemáticos citados na literatura específica e utilizados para a representação do processo de secagem em camada delgada de produtos agrícolas. Com base nos resultados obtidos, o modelo matemático de Midilli foi o selecionado para representar a cinética de secagem para as folhas de espinheira-santa em camada delgada. O aumento da temperatura do ar promoveu: redução do tempo de secagem; aumento do coeficiente de difusão efetivo e dos valores de energia livre de Gibbs, enquanto os da entalpia e entropia decrescem.

**Palavras-chave:** modelo de Midilli, coeficiente de difusão, propriedades termodinâmicas, razão de umidade.

## 1.INTRODUÇÃO

A *Maytenus ilicifolia* (Schrad.) Planch, pertencente à família Celastraceae, é conhecida popularmente como espinheira-santa, devido a aparência de suas folhas, as quais possuem as bordas com espinhos, e por possuir propriedades medicinais, também é conhecida por outras sinonímias vulgar, como cancerosa, espinheira-divina, cancorosa-de-sete-espinhos (LORENZI e MATOS, 2008), sendo esta uma planta nativa da região do sul do Brasil. Os principais metabólitos secundários isolados, destacam-se os pertencentes aos grupos dos triterpenos, flavonoides e taninos (VIEIRA, 1999; MARIOT e BARBIERI, 2007).

As folhas secas da espinheira santa são utilizadas na forma de decocto, infuso, extrato fluido, pó, elixir e xarope, empregadas como anti-inflamatório nas úlceras estomacais, azia e dores de estômago, além de serem utilizadas, também, como analgésico e cicatrizante (GRANDI, 2014). Ainda, segundo Lorenzi e Matos (2008) estudos iniciais indicaram que a espinheira-santa possui compostos antibióticos apresentando potente atividade antitumoral e antileucêmica em doses muito baixas.

A principal fonte de matéria prima para a produção de produtos fitoterápicos, normalmente, é a parte aérea das plantas medicinais, sendo essas partes geralmente colhidas com elevado teor de água. A água é a principal responsável pelo aumento de atividades metabólicas e mudanças químicas e físicas que ocorrem no produto durante o seu armazenamento, sendo assim, é de fundamental importância, para a manutenção da qualidade de plantas medicinais após a colheita, a redução de seu teor de água por meio da secagem (GONELI, 2014a).

A secagem de plantas medicinais se torna fundamental, visando atender as necessidades das indústrias farmacêuticas de fitoterápicos, as quais não têm meios de utilizar plantas frescas na quantidade exigida para a produção industrial (LORENZI e MATOS, 2008), sendo necessário desidratar e armazenar as estruturas de interesse das plantas medicinais.

Ao realizar o estudo da secagem de produtos agrícolas, em camada delgada, associando ao tempo necessário para que ocorra o processo em questão, é possível descrever a curva de secagem do produto e ajustar modelos matemáticos que representem o devido processo de modo satisfatório. Com as curvas de secagem obtêm-se importantes informações para o desenvolvimento de processos, otimização e dimensionamento de equipamentos destinados à secagem de produtos agrícolas.



Modelagem Matemática na literatura há três tipos de modelos usados para representar as curvas de secagem de produtos agrícolas em camada delgada, sendo eles os modelos teóricos, semi-teóricos e os empíricos. Os modelos teóricos, que consideram apenas a resistência interna a transferência de calor e água entre o produto e o ar de secagem e os modelos semi-teóricos e os empíricos consideraram a resistência externa, a temperatura e umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002).

Além das curvas de secagem, outro parâmetro importante de ser avaliado durante a secagem é o coeficiente de difusão efetivo, o qual engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a movimentação de água em um sólido. A difusividade expressa à facilidade de remoção de água de um produto. Ao alterar as condições de secagem, como temperatura e velocidade do ar, varia-se a difusividade, tornando assim explícito que a mesma não é intrínseca ao material (OLIVEIRA et al., 2006).

O conhecimento das propriedades termodinâmicas do processo de secagem, de produtos agrícolas, nos permite calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades da água adsorvida, avaliar a microestrutura dos alimentos, bem como estudar os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos, tornando-se assim uma importante fonte de informações para projetar equipamentos destinados a secagem de produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2010).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho ajustar e modelar, estatisticamente, modelos matemáticos ao processo de secagem em camada delgada de folhas de espinheira-santa, bem como determinar o coeficiente de difusão efetivo e suas propriedades termodinâmicas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Espinheira Santa

O uso de plantas medicinais é uma prática comum, a qual tem sido transmitida de geração a geração. O interesse por plantas medicinais tem aumentado tanto em países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento. O motivo deve-se ao retorno aos hábitos de vida saudável e natural, aos efeitos colaterais que os medicamentos sintéticos normalmente apresentam, às pesquisas crescentes na área de plantas medicinais com descobertas de novos princípios ativos, e o preço que na maioria dos casos é mais baixo que os medicamentos convencionais (SILVA et al., 2005).

As espécies medicinais apresentam metabolismo secundário produzindo substâncias químicas com função de proteção ao ataque de pragas e doenças. Estas substâncias que são nocivas a alguns níveis de organismos podem apresentar atividades terapêuticas a outros, e às vezes a relação tóxico/terapêutica depende apenas da dose (MAGALHÃES, 1997). Corrêa Junior et al. (1994) descrevem as influências climáticas, como temperatura, luminosidade, umidade, altitude e latitude, sobre a produção das substâncias ativas, podendo haver aumento ou diminuição dos seus teores. Um bom indicador da qualidade das plantas medicinais é o teor de princípio ativo, que por sua vez é influenciado pela época de colheita, pelo manuseio correto durante e após a colheita, pelo beneficiamento adequado e pela armazenagem apropriada (CORRÊA JUNIOR et al., 1994; SCHEFFER, 2002).

O nome espinheira santa é devido às folhas possuírem bordas com espinhos e propriedades medicinais. É conhecida popularmente como “espinheira-santa”, “espinheira-divina”, “cancorosa”, “cancerosa” e “cancrosa” (BRASIL, 2011).

A espinheira santa (*Maytenus ilicifolia* Schrad.), é uma planta nativa da região do sul do Brasil, utilizada principalmente para o tratamento de gastrites e úlceras estomacais. Essas duas atividades medicinais são comprovadas por pesquisas coordenadas pela Central de Medicamentos (CEME) do Ministério da Saúde do Brasil (DI STASI, 2004). Suas atividades farmacológicas estão ligadas aos grupos dos taninos e flavonoides (NEGRI, 2007). Também possui atividade antiespasmódica, anti-inflamatória e cicatrizante, entre outras (NASCIMENTO et al., 2005).

## 2.2 Secagem

As plantas apresentam diferentes quantidades de água em diferentes órgãos: sementes e frutos de 5 a 10%, folhas 60 a 90%, raízes e rizomas 70 a 85% e as flores e frutos carnosos de 80 a 90% (BORSATO, 2003). Algumas atividades metabólicas (processos enzimáticos, auto oxidação, escurecimento não enzimático), bacterianas e fúngicas não cessam quando essas partes das plantas na ocasião da colheita. Logo, é extremamente importante reduzir o teor de água assim que o produto é colhido, prevenindo a deterioração do material (HORNOK, 1992).

A secagem é um método antigo de preservação de alimentos contra danos microbiológicos, porém o processo pode não ser letal a todos os micro-organismos e muitas espécies podem sobreviver. As mais resistentes são as bactérias formadoras de esporos, os bolores, as leveduras e as bactérias termo-resistentes. A sobrevivência de micro-organismos durante e após a secagem dependerá das condições físico-químicas, como atividade de água, temperatura, pH, uso de conservantes e presença de oxigênio. Os fatores que influenciam a contaminação são: a qualidade da planta fresca, o tempo entre a coleta e o início da secagem, o tempo e a temperatura de secagem, o teor de água final e os cuidados de higiene durante e após a secagem. A remoção da água pela secagem aumenta a concentração de solutos e reduz a disponibilidade da água para crescimento de micro-organismos, mas para uma completa estabilidade, recomenda-se uma atividade de água abaixo de 0,6 (MUJUMDAR, 1995; WHO, 1998).

A secagem é mais eficiente quando realizada em maior temperatura, maior velocidade do ar e menor umidade relativa, porém altas temperaturas promovem o rompimento das estruturas celulares, levando à morte ou desencadeamento de reações enzimáticas e não enzimáticas alterando a cor, o sabor e o odor da planta. O efeito térmico pode hidrolisar e degradar carboidratos causando escurecimento (BORSATO, 2003).

A secagem da planta quando feita em secadores, as temperaturas variam de 30 °C a 60 °C e os tempos de 2 a 25 horas. Tanto a temperatura quanto o tempo elevado pode prejudicar a qualidade do produto (REIS e SILVA, 2004). No entanto, Borsato (2003) afirma que nas secagens empregando temperaturas abaixo de 80° C não ocorre degradação de enzimas, mas inibição, podendo ser reativadas.

As plantas medicinais são muito sensíveis ao processo de secagem e o uso de altas temperaturas causam alterações na quantidade e qualidade dos princípios ativos, principalmente nos teores de óleo essencial (MELO et al., 2004; NEGRI et al., 2006).

O ponto final de secagem é determinado pelo produtor quando as folhas ficam “crocantes”, quebrando facilmente ao serem dobradas. O teor de água nesse ponto é de aproximadamente 5%, mas absorve umidade se deixada exposta ao ambiente pela higroscopicidade, podendo chegar de 8 a 12% (NEGRI, 2007). Sendo assim, já prevendo a absorção de água em função da higroscopicidade, em experimentos científicos as folhas são secas até o teor de água de aproximadamente 10%.

### **2.3 Propriedades Termodinâmicas**

O conhecimento das propriedades termodinâmicas nos processos de secagem de produtos agrícolas é importante fonte de informações para projetar equipamentos de secagem, calcular a energia requerida nesse processo, estudar as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos.

Dentre os parâmetros termodinâmicos analisados em processo de secagem de produtos agrícolas, destacam-se três, entalpia específica, entropia específica, energia livre de Gibbs, os quais são estudados para diversos produtos agrícolas (JIDEANI e MPOTOKWANA, 2009; CORRÊA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2014).

Mudanças de entalpia fornecem uma medida da variação de energia que ocorre quando da interação das moléculas de água com os constituintes do produto durante os processos de sorção. A entropia esta associada com a ligação ou repulsão das forças no sistema e está associada com o arranjo espacial da relação água-produto, ou seja, a caracteriza o grau de ordem ou desordem existente no sistema água-produto (MCMINN et al., 2005).

A energia livre de Gibbs é um indicativo da afinidade do produto pela água, fornecendo um critério de avaliação da desorção da água. Para valores de energia livre de Gibbs negativos, o processo é espontâneo, enquanto para valores positivos é não-espontâneo (TELIS et al., 2000).

Mudanças na energia livre de Gibbs durante a troca de água entre o produto e o meio são a energia requerida para transferir moléculas de água do estado de vapor para uma superfície sólida ou vice-versa. Essa é a quantidade que pode ser considerada como uma medida do trabalho feito pelo sistema para realizar o processo de desorção ou o de adsorção. O equilíbrio será alcançado quando o gradiente de energia livre de Gibbs for zero (NAYAK e PANDEY, 2000).

## 2.4 Modelagem Matemática

A representação matemática do processo de secagem de diversos produtos agrícolas é utilizada como auxílio ao desenvolvimento de processos e no dimensionamento de equipamentos utilizados na fase pós-colheita. Com isso pode-se estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produtos que está diretamente ligado ao gasto energético, que por sua vez refletirá no custo de processamento e influenciará no preço final do produto. (VILELA e ARTUR (2008).

De acordo com Resende et al. (2008) as curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores .

Em termos gerais podemos dizer que modelagem matemática pode ser entendida como o uso de modelos matemáticos para resolver problemas reais. Isso significa encontrar alguma representação matemática para uma situação real, buscando entendê-la e tentando resolver algum problema relacionado com aquela situação. (ARAÚJO, 2002).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas da Faculdade de Ciências Agrárias - FCA, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados, no município de Dourados, MS. Foram utilizadas folhas da parte aérea de espinheira-santa, colhidas no Horto de Plantas Medicinais – HPM (22°11'43.7''S e 054°56'08.5''W) da FCA. A exsicata está depositada no Herbário DDMS da UFGD sob número 4882.

As folhas foram colhidas nas primeiras horas da manhã, após não haver mais orvalho sobre suas superfícies. A coleta foi realizada de modo aleatório, e posteriormente foram selecionadas folhas com ausência de partes danificadas e homogêneas com a finalidade de evitar qualquer tipo de interferência nos resultados.

O teor de água inicial e de equilíbrio das folhas de espinheira-santa foi determinado logo após a coleta e no final do processo de secagem, respectivamente, utilizando-se o método gravimétrico recomendado pela ASABE (2010) para plantas forrageiras e similares utilizando três repetições, em estufa com circulação forçada de ar a  $103 \pm 1$  °C durante 24 h.

Todos os ensaios de secagem foram realizados em um secador experimental, conforme esquematizado na (Figura 1), em que as folhas de espinheira-santa foram secas em quatro bandejas de 0,2 m de diâmetro cada. O secador possui um controle preciso de temperatura e velocidade do ar, mantendo assim essas condições constantes durante todo o processo de secagem.

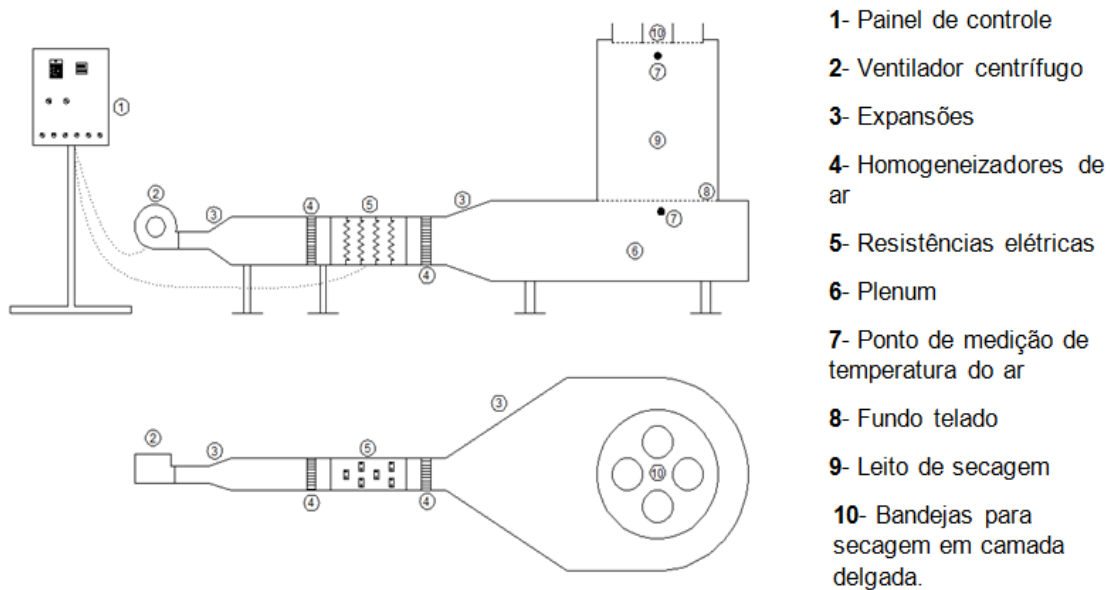


FIGURA 1. Secador experimental utilizado na secagem de folhas de espinheira-santa.

A secagem do produto foi realizada para diferentes condições controladas de temperatura, sendo, 40, 50, 60, e 70 °C, com as respectivas umidades relativas do ar de secagem de 20,4; 16,7; 8,9 e 4,5%, e na velocidade do ar de secagem de 0,4 m s<sup>-1</sup>, até que o produto atingisse o teor de água de equilíbrio. A umidade relativa do ar de secagem foi calculada utilizando-se o software Grapsi versão 8.1.1, com base em dados de condições do ambiente externo, o qual foi monitorado periodicamente durante o processo de secagem, utilizando três termos-higrômetro, instalados próximos ao secador experimental .

O teor de água inicial das folhas de espinheira-santa submetidas aos ensaios de secagem foi de aproximadamente 1,80 ± 0,10 (b.s.). Para fins de modelagem matemática considerou-se o fim da secagem quando o teor de água do produto esteve em 0,08 ± 0,01 decimal (b.s.).

Foram colocadas em cada bandeja do secador experimental aproximadamente 15 g de produto, em que cada bandeja constituiu uma repetição, totalizando assim, quatro repetições para cada temperatura de secagem avaliada. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, utilizando uma balança digital com resolução de 0,01 g. O tempo inicial entre as pesagens para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C foram de 5 minutos nas primeiras horas de experimento, após as duas primeiras horas o tempo entre as pesagens foi controlado por meio da diferença de massas (conhecendo-se a massa e o teor de água inicial das folhas), de forma que não permitisse diferenças grandes de teor de água entre as leituras. Para o ensaio na temperatura de 70 °C o tempo entre as leituras de

massa foi de 3 em 3 min em virtude do tempo de secagem ser relativamente menor com relação às demais temperaturas, obtendo-se então, uma quantidade suficiente de dados para realizar o ajuste dos modelos matemáticos por regressão não linear.

Para calcular a razão de umidade (RU), nas diferentes temperaturas de secagem, utilizou-se a Equação (1):

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

U: teor de água do produto em um determinado tempo, decimal (b.s.);

$U_e$ : teor de água de equilíbrio do produto, decimal (b.s.);

$U_i$ : teor de água inicial do produto, decimal (b.s.).

Aos dados de razão umidade, obtidos experimentalmente durante a secagem de folhas de espinheira-santa, foram ajustados 13 modelos matemáticos para prever o fenômeno da secagem de produtos agrícolas. A Tabela 1 apresenta os modelos que foram avaliados neste trabalho.



Tabela 1. Modelos matemáticos para estimar as curvas de secagem de folhas de espinheira-santa.

Designação do modelo	Modelo	
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k b \theta)$	(2)
Dois termos	$RU = a \exp(-k \theta) + b \exp(-k_1 \theta)$	(3)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k a \theta)$	(4)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-k \theta)$	(5)
Henderson e Pabis Modificado	$RU = a \exp(-k \theta) + b \exp(-k_0 \theta) + c \exp(-k_1 \theta)$	(6)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k \theta) + c$	(7)
Midilli	$RU = a \exp(-k \theta^n) + b \theta$	(8)
Newton	$RU = a \exp(-k \theta^n)$	(9)
Page	$RU = \exp(-k \theta^n)$	(10)
Thompson	$RU = \exp\{-a - (a^2 + 4 b \theta)^{0,5}\}/2b\}$	(11)
Valcam	$RU = a + b \theta + c \theta^{1,5} + d \theta^2$	(12)
Verna	$RU = a \exp(-k \theta) + (1-a) \exp(-k_0 \theta)$	(13)
Wang e Singh	$RU = 1 + a \theta + b \theta^2$	(14)

em que:

$\theta$ : tempo de secagem, h

$k, k_0, k_1$ : parâmetros de secagem,  $h^{-1}$ ;

$a, b, c, n$ : coeficientes dos modelos.

Os coeficientes de difusão efetivo das folhas de espinheira-santa, para as diferentes temperaturas de secagem (40, 50, 60, e 70 °C), foram calculados utilizando a Equação 15, baseado na teoria da difusão líquida. Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick considerando-se a forma geométrica do produto como aproximada de uma placa plana e com aproximação de oito termos.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 D_i \left(\frac{\theta}{4L}\right)^2\right] \quad (15)$$

em que

$D_i$ : coeficiente de difusão efetivo,  $m^2 s^{-1}$ ;

$L$ : espessura do produto, m;

n: número de termos do modelo.

A espessura das folhas de espinheira-santa foi mensurada utilizando-se um micrômetro digital com resolução de 0,001 mm. Foram realizadas medições em 50 folhas, sendo que em cada folha foram realizadas cinco medições em diferentes locais, após isso foi calculada a média das espessuras das folhas, que foi de 0,4253 mm.

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita na Equação 16:

$$D_i = D_o \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (16)$$

em que:

$D_o$ : fator pré-exponencial;

$E_a$ : energia de ativação,  $\text{kJ mol}^{-1}$ ;

$R$ : constante universal dos gases,  $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;

$T_a$ : temperatura absoluta, K.

As propriedades termodinâmicas entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, relacionadas ao processo de secagem das folhas de espinheira-santa, foram determinadas através do método descrito por Jideani e Mpotokwana (2009) de acordo com as Equações 17, 18 e 19 descritas abaixo:

$$h = E_a - RT \quad (17)$$

$$s = R \left( \ln D_o - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (18)$$

$$G = h - T s \quad (19)$$

em que:

$h$ : entalpia específica,  $\text{J mol}^{-1}$ ;

$s$ : entropia específica,  $\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;

$G$ : energia livre de Gibbs,  $\text{J mol}^{-1}$ ;

$k_B$ : constante de Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ;

$h_p$ : constante de Planck,  $6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$ .

O ajuste dos dados experimentais de cinética de secagem de folhas de espinheira-santa foi submetido à análise de regressão não linear, pelo método de Gauss-Newton, e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas. Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, foi utilizado o programa computacional STATISTICA 8.0.

Para análise do grau de ajuste de cada modelo foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação ajustados, do erro médio relativo, do desvio padrão da estimativa e o comportamento da distribuição dos resíduos.

Os valores do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE) foram calculados conforme descrito pelas Equações 20 e 21:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (20)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (21)$$

em que:

n: número de observações experimentais;

Y: valor experimental;

$\hat{Y}$ : valor estimado pelo modelo;

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos número de parâmetros/coeficientes do modelo).

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÕES

Na Tabela 2, encontram-se os valores dos parâmetros estatísticos, utilizados para comparação e seleção dos treze modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de secagem de folhas de espinheira-santa em diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos (SE - desvio padrão da estimativa, P - erro médio relativo e  $R^2$  - coeficiente de determinação) e distribuição dos resíduos (TD = tendenciosa; AL = aleatória) para os treze modelos ajustados às curvas de secagem de folhas de espinheira-santa.

Modelos	SE	P	$R^2$	Resíduos	SE	P	$R^2$	Resíduos	SE	P	$R^2$	Resíduos	SE	P	$R^2$	Resíduos
	40 °C				50 °C				60 °C				70 °C			
2	0,0254	10,716	0,992	TD	0,0212	15,350	0,994	TD	0,0124	5,808	0,998	AL	0,0145	6,525	0,998	AL
3	0,0319	13,426	0,988	TD	0,0264	14,99	0,991	TD	0,0123	6,434	0,998	AL	0,0347	19,634	0,992	TD
4	0,0249	10,716	0,992	TD	0,0233	15,39	0,992	TD	0,0202	13,661	0,996	TD	0,0187	9,122	0,997	TD
5	0,0228	11,735	0,993	TD	0,0254	14,99	0,991	TD	0,031	24,958	0,990	TD	0,0301	19,634	0,992	TD
6	0,0061	2,652	0,999	AL	0,0332	20,556	0,987	TD	0,0451	33,197	0,986	TD	0,0419	18,878	0,992	TD
7	0,012	2,419	0,998	AL	0,0234	9,112	0,992	TD	0,0126	7,529	0,998	AL	0,0154	7,794	0,998	AL
8	0,0118	3,816	0,998	AL	0,0051	2,114	0,999	AL	0,0138	7,414	0,998	AL	0,017	6,797	0,998	AL
9	0,0244	10,716	0,992	TD	0,0352	14,127	0,982	TD	0,0311	26,722	0,989	TD	0,0295	20,939	0,991	TD
10	0,0249	10,614	0,992	TD	0,0284	18,299	0,988	TD	0,0212	12,906	0,995	TD	0,0197	8,513	0,996	TD
11	0,0249	10,717	0,992	TD	0,0333	18,572	0,984	TD	0,0322	26,728	0,989	TD	0,0313	20,942	0,991	TD
12	0,0106	1,733	0,998	AL	0,0116	4,089	0,998	AL	0,0092	2,682	0,999	TD	0,0117	2,416	0,999	TD
13	0,0254	10,716	0,992	TD	0,0365	14,127	0,982	TD	0,0124	5,808	0,998	TD	0,0145	6,524	0,998	TD
14	0,0348	10,764	0,985	TD	0,0587	24,408	0,952	TD	0,0178	7,704	0,996	TD	0,0176	7,403	0,997	TD

Observa-se na Tabela 2, para todas as temperaturas utilizadas na secagem de folhas de espinheira-santa, os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,95. De acordo com Kashaninejad et al. (2007) valores superiores a 0,95 indicam representação satisfatória desses modelos para descrição do processo. No entanto, o coeficiente de determinação, isoladamente, não constitui um bom critério para a seleção de modelos não lineares (MOHAPATRA E RAO, 2005) tornando-se necessário a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos.

Em geral, os modelos de Logarítmico (7), Midilli (8) e de Valcam (12) foram os que apresentaram as menores magnitudes do desvio padrão da estimativa (Tabela 2). De acordo com Draper e Smith (1998) a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa. Dessa forma, quanto mais próximos de zero forem os valores do desvio padrão da estimativa (SE), melhor será o ajuste do modelo em relação aos dados observados.

Observa-se na Tabela 2 que os modelos que apresentaram valores de erro médio relativo (P) menor que 10%, no processo de secagem de folhas de espinheira-santa para todas as temperaturas estudadas, foram os modelos de Logarítmico (7), Midilli (8) e Valcam (12). Segundo Kashaninejad et al. (2007) os valores do erro médio relativo (P) indicam o desvio dos dados observados a partir da curva estimada pelo modelo. Mohapatra e Rao (2005) consideram modelos com valores de erro médio relativo superior a 10% inadequados para representar o processo de secagem.

O modelo proposto por Midilli foi o único a apresentar distribuição do resíduo aleatória para todas as temperaturas do ar de secagem (Tabela 2). Segundo Goneli (2008) um modelo é considerado aceitável se apresentar a distribuição dos resíduos aleatória, ou seja, se os valores dos resíduos se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero, caso o modelo apresente valores distantes do eixo zero com tendência a formação de “figura”, a distribuição é considerada tendenciosa. E neste caso, o modelo não deve ser recomendado para representação do fenômeno em questão.

Diante da análise dos parâmetros estatísticos e do comportamento da distribuição dos resíduos, recomenda-se o modelo de Midilli para a representação do processo de secagem em camada delgada de folhas de espinheira-santa.

Radünz et al. (2011) avaliando a cinética de secagem de folhas de carqueja em seis temperaturas concluíram que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, sendo o único apto a representar o comportamento em todas as condições

estudadas. O modelo de Midilli também é recomendado para descrever o processo de secagem de diversas outras folhas, como: manjeriço (REIS et al., 2012) *Gundelia tourneforti* L. (EVIN, 2012), capim limão (MARTINAZZO et al., 2007) e erva baleeira (GONELI et al., 2014b).

Segundo Goneli et al. (2014b) o melhor ajuste do modelo de Midilli aos dados experimentais de secagem de plantas medicinais está ligado, provavelmente, à rápida perda de água nos estádios iniciais do processo neste tipo de produto, gerando uma curva de secagem mais acintosa e mais bem caracterizada matematicamente, por este modelo.

O modelo de Midilli descreve fielmente a cinética de secagem das folhas de espinheira-santa (Figura 2). Independente da temperatura do ar de secagem os valores estimados pelo modelo são muito próximos ou iguais aos valores observados experimentalmente.

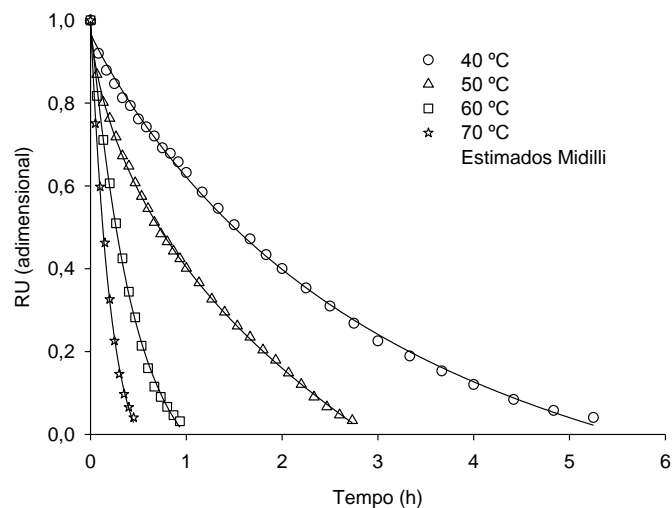


Figura 2. Valores de razão de umidade (RU) experimentais e estimados, pelo modelo de Midilli, para o processo de secagem das folhas de espinheira-santa.

O tempo necessário para que as folhas de espinheira-santa atingissem o teor de água de, aproximadamente,  $0,08 \pm 0,01$  decimal (b.s.), foi de 5,3; 2,7; 0,9 e 0,5 horas, para as temperaturas de 40; 50; 60 e 70 °C, respectivamente (Figura 2). Nota-se que com o aumento da temperatura do ar de secagem a remoção da mesma quantidade de água nas folhas é facilitada, decorrente da maior diferença de pressão de vapor d'água entre o produto e o ar de secagem. Este fenômeno foi observado por diversos pesquisadores também trabalhando com

outras espécies de plantas medicinais (MARTINAZZO et al., 2007; REIS et al., 2012; PRATES et al., 2012; RADÜNZ et al., 2011; GONELI et al., 2014b).

Na Tabela 3 são apresentados os valores de difusividade efetiva e os coeficientes do modelo de Midilli ajustado aos dados observados da secagem de folhas de espinheira-santa.

Tabela 3. Parâmetro e coeficientes do modelo de Midilli e coeficiente de difusão efetivo para as diferentes temperaturas de secagem das folhas de espinheira-santa.

Temperatura (°C)	Parâmetro e coeficientes do modelo de Midilli				D x 10 <sup>-11</sup> (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
	a	K	n	b	
40	0,9693 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	0,4086 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	0,9348 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	-0,0227 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	0,7254
50	0,9984 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	0,7205 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	0,6446 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	-0,0820 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	1,5095
60	0,9881 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	2,5280 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	1,0396 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	-0,0824 <sup>(p=0,007)</sup>	4,6500
70	0,9935 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	5,7291 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	1,0565 <sup>(p&lt;0,001)</sup>	-0,1244 <sup>(p=0,126)</sup>	9,6105

As informações sobrescritas à direita do valor de cada coeficiente do modelo de Midilli é o p valor com base no teste t.

Observa-se que com exceção do coeficiente “b” na temperatura de 70 °C, em todas as demais condições os coeficientes e parâmetros são significativos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t. Com base nisso, pode-se afirmar que o modelo ajustado é capaz de descrever com fidelidade o fenômeno.

Verifica-se ainda na Tabela 3, que o parâmetro “k” e o coeficiente “b” do modelo proposto por Midilli apresentaram uma tendência de comportamento definido. Com elevação da temperatura do ar de secagem, houve incremento nos valores encontrados para estes parâmetros, sendo que, para os coeficientes “a” e “n” não observou-se nenhuma tendência.

O coeficiente “n” esta relacionado a algum fenômeno de secagem, uma vez que o modelo de Midilli é classificado como modelo semi-empírico (MIDILLI et al., 2002). Já o parâmetro de secagem “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, sendo que a difusão líquida controla o processo (BABALIS E BELESSIOTIS, 2004). Conforme a magnitude do parâmetro “k” se eleva em razão do aumento da temperatura do ar de secagem, a difusividade efetiva também aumenta (Tabela 3), ou seja, quanto maior a magnitude do parâmetro “k” maior a difusividade efetiva no processo de secagem.

A relação do parâmetro “k” e coeficiente “b”, do modelo de Midilli em função da temperatura (T, em °C) do ar de secagem das folhas de espinheira-santa, pode ser descrita, respectivamente, pelas equações lineares a seguir:

$$k = 0,1777 T - 7,4263 \quad (R^2 = 0,8832) \quad (22)$$

$$b = -0,0031 T + 0,0901 \quad (R^2 = 0,8898) \quad (23)$$

Observa-se nas Equações 22 e 23, elevadas magnitudes do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Substituindo estas equações por seus respectivos coeficientes e utilizando a média dos valores dos coeficientes “n” e “a”, para todas as condições do ar de secagem, é possível estimar o teor de água das folhas de espinheira-santa em função do tempo e da temperatura do ar de secagem, por meio da seguinte equação:

$$U = U_e + (U_i - U_e) \{0,9873 \exp[-(0,1777 T - 7,4263)\theta^{0,918855}] + (-0,0031 T + 0,0901)\theta\} \quad (24)$$

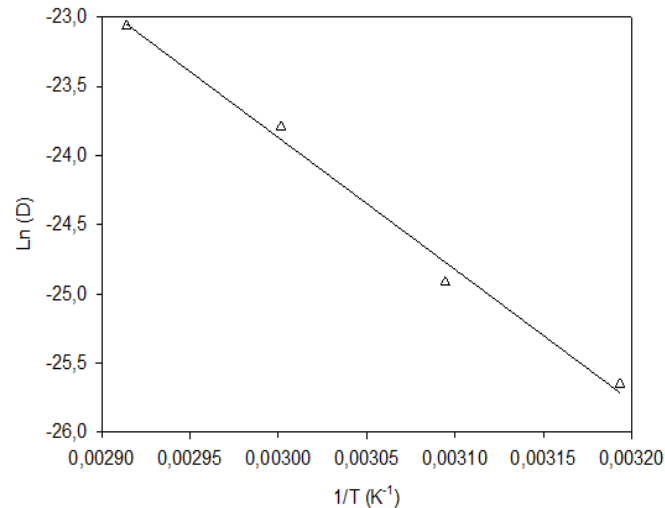
Os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentam com o incremento da temperatura do ar de secagem (Tabela 3), sendo este comportamento observado por vários pesquisadores ao estudarem plantas medicinais (MARTINAZZO et al., 2007; PRATES et al., 2012; GONELI et al., 2014b). Goneli (2008) explica que havendo um aumento da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água e diminui a viscosidade da mesma, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluído ao escoamento. As variações desta propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares dos produtos agrícolas, que juntamente com a vibração mais intensa das moléculas de água, contribuem para uma difusão mais rápida.

A variação entre os valores do coeficiente de difusão efetivo para a secagem de folhas de espinheira-santa ficou entre  $0,7254 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e  $9,6105 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , para a faixa de temperatura entre 40 e 70 °C. De acordo com Madamba et al. (1996) os valores do coeficiente de difusão efetivo para a secagem de produtos agrícolas encontram-se na ordem de  $10^{-9}$  a  $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , corroborando com o presente trabalho.

Goneli et al. (2014a) ao estudarem a secagem de folhas de erva baleeira nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, verificaram que a variação do coeficiente de difusão ficou entre  $1,1294 \times 10^{-11}$  e  $9,4933 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Já Martins et al. (2015) estudando a secagem de folhas de timbó para a mesma faixa de temperatura obtiveram valores entre  $0,6630 \times 10^{-11}$  e  $12,0712 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Nota-se que a variação do coeficiente de difusão efetivo das folhas de timbó, espinheira-santa e erva baleeira é semelhante. Um dos principais fatores que contribuem para alteração do coeficiente de difusão efetivo é a espessura do produto, uma vez que, quanto maior a espessura, maior será a distância que a água deverá percorrer para que o processo de secagem ocorra.



Na Figura 3 estão apresentados os valores de  $\ln(D)$  em função do inverso da temperatura absoluta ( $1/K^{-1}$ ) obtidos para as folhas de espinheira-santa. A dependência do coeficiente de difusão efetivo, com relação à temperatura do ar de secagem, tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (MARTINAZZO et al., 2007; GONELI et al., 2014b).



**Figura 3.** Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar, durante a secagem das folhas de espinheira-santa.

A inclinação da curva da representação de Arrhenius (Figura 3) fornece a relação  $E_a/R$ , enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de  $D_0$ . A Equação 25 apresenta o coeficiente da equação de Arrhenius ajustada para os coeficientes de difusão efetivo das folhas de espinheira-santa, calculado de acordo com a Equação 16.

$$D_i = 113,3865 \exp\left(\frac{79,2655}{R T_a}\right) \quad (25)$$

A energia de ativação para a difusão da água durante a secagem das folhas de espinheira-santa foi de  $79,27 \text{ kJ mol}^{-1}$  (Equação 25). Este valor apresenta-se mais elevado do que o calculado por Reis et al. (2012) ao avaliar a secagem de folhas de manjeriço, que obteve energia de ativação de  $70,79 \text{ kJ mol}^{-1}$ , e por Goneli et al. (2014b) avaliando a secagem de folhas de aroeira ( $74,96 \text{ kJ mol}^{-1}$ ). O valor de energia de ativação mais elevado para as folhas de espinheira-santa evidencia a necessidade de maior energia para desencadear o processo de difusão de líquido quando comparado com as folhas de manjeriço e aroeira.

Os diferentes valores de energia de ativação para diferentes produtos agrícolas podem ser atribuídos a características físicas e biológicas dos produtos (MARTINS et al.,

2015). Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto. A energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto (KASHANINEJAD et al., 2007). Segundo Zogzas et al. (1996) a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol<sup>-1</sup>, estando a energia de ativação encontrada no presente trabalho dentro da faixa destes valores propostos por estes autores.

Em relação às propriedades termodinâmicas observa-se que os valores de entalpia reduziram com o aumento da temperatura (Tabela 4). Menores valores de entalpia indicam menor energia necessária para remover a água ligada ao produto durante a secagem (OLIVEIRA et al., 2010). Comportamento semelhante foi observado para os valores de entropia, que reduziu com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Tabela 4. Propriedades termodinâmicas do processo de secagem das folhas de espinheira-santa: entalpia específica (h), entropia específica (s) e energia livre de Gibbs (G).

Temperatura (°C)	h (kJ mol <sup>-1</sup> )	s (kJ mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	G (kJ mol <sup>-1</sup> )
40	76,6619	-0,2060	141,1675
50	76,5787	-0,2062	143,2286
60	76,4956	-0,2065	145,2923
70	76,4124	-0,2067	147,3585

A redução da entalpia e entropia com aumento da temperatura está relacionada à maior desordem do sistema água-produto (CORRÊA et al., 2010). Segundo Goneli et al. (2010) a entropia é uma grandeza termodinâmica ligada ao grau de desordem cujos valores se elevam durante o processo natural em um sistema isolado. Os valores negativos de entropia podem estar atribuídos à existência de adsorção química e/ou modificações estruturais do adsorvente (MOREIRA et al., 2008).

Diferentemente dos valores de entalpia e entropia, ocorreu um aumento dos valores da energia livre de Gibbs com o aumento da temperatura do ar de secagem (Tabela 4). Nkolo Meze'e et al. (2008) relatam que a energia livre de Gibbs é atribuída ao trabalho necessário para tornar os locais de sorção disponíveis.

Os valores positivos da energia livre de Gibbs indicam que a secagem das folhas de espinheira-santa não foi um processo espontâneo, ou seja, é necessário adição de uma fonte externa de calor para que haja remoção de água.

Martins et al. (2015) obtiveram valores semelhante para as propriedades termodinâmicas estudando o processo de secagem de folhas de timbó, nas temperaturas de 40

a 70 °C, onde a variação de entalpia específica (h), entropia específica (s) e energia livre de Gibbs (G), foram de: (78,7861 a 78,5367 KJ mol<sup>-1</sup>); (-0,1958 a -0,1966 KJ mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) e (140,1081 a 145,9942 KJ mol<sup>-1</sup>), respectivamente, corroborando com o presente trabalho.

## 5. CONCLUSÃO

1. O modelo matemático de secagem proposto por Midilli foi o que apresentou melhor ajuste estatístico aos dados experimentais da cinética de secagem, sendo o modelo selecionado para a representação da secagem das folhas de espinheira-santa.

2. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem e esta relação pode ser descrita pela equação de Arrhenius que apresentou energia de ativação para a difusão líquida, durante a secagem de  $79,27 \text{ kJ mol}^{-1}$ , para as folhas de espinheira-santa.

3. Para a faixa de temperatura estudada a entalpia e a entropia decresceram com o aumento da temperatura, enquanto que a energia livre de Gibbs aumentou.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers. 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.

ARAÚJO, J. L. *Cálculo, tecnologias e modelagem matemática: as discussões dos alunos*. Tese de doutorado em Educação Matemática – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

BABALIS, 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.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Formulário de Fitoterápicos da Farmacopeia Brasileira. Brasília: Anvisa, 2011. 126 p.

BORSATO, A.V. **Secagem da camomila sob diferentes temperaturas e vazões específicas do ar**. Curitiba, 2003. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

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, 2010.

CORRÊA JUNIOR, C.; MING, L.C.; SCHEFFER, M.C. **Cultivo de plantas medicinais, condimentares e aromáticas**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP. 1994. 162p.

DI STASI, L. C. Aspectos químicos e farmacológicos da espinheira-santa: uma análise da utilidade dos dados. In: REIS, M. S.; SILVA, S. R. (Org.). **Conservação e uso sustentável de plantas medicinais e aromáticas: *Maytenus* spp., espinheira-santa**. Brasília: Ibama, 2004. p. 67-92.

EVIN, D. Thin layer drying of *Gundelia tournefortii* L. **Food and Bioproducts Processing**, v.90, n.2, p.323-332, 2012.

GONELI, A.L.D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento.** 2008. 186p. Tese (Doutorado – Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transactions of the ASAE**, v.53, n.1, p.191-197, 2010.

GONELI, A.L.D.; VIEIRA, M.C.; BENITEZ, H.C.V.; GONÇALVES, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, n.1, p.56-64, 2014a.

GONELI, A.L.D.; NASU, A.K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W.D.; SARATH, K.L.L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenácea* DC.). **Revista brasileira de plantas medicinais**, v.16, n.2, p.434-443, 2014b.

GONELI, A.L.D.; VIEIRA, M.C.; BENITEZ, H.C.V.; GONÇALVES, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, n.1, p.56-64, 2014.

GRANDI, S. M. **Tratado das plantas medicinais: mineiras, nativas e cultivadas.** 1.ed. Dados eletrônicos – Belo Horizonte: Adaequatio Estúdio, 2014. 1204p.

HORNOK, L. Primary Processing of Medicinal Plants. In:\_\_\_\_\_. **Cultivation and processing of medicinal plants.** Chichester: John Wiley & Sons, 1992. p.86-93.

JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v.92, n.2, p.182-188, 2009.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, n.1, p.98-108, 2007.

LORENZI, H.; MATOS, F.J.A. **Plantas medicinais no Brasil: Nativas e exóticas.** 2.ed. Nova Odessa-SP: Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda, 2008. 544p.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLI, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MARTINS, E.A.S.; LAGE, E.Z.; GONELI, A.L.D.; FILHO, C.P.H.; LOPES, J.G. Cinética de secagem de folhas de timbó (*Serjania marginata* Casar). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.3, p.238-244, 2015.

MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MELO, E.C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.301-306, 2007

MARIOT, M.P.; BARBIERI, R.L. Metabólitos secundários e propriedades medicinais da espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reiss. e *Maytenus aquifolium* Mart.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais, Botucatu**, v.9, n.3, p. 89-99, 2007.

MAGALHÃES, P.M. **O Caminho Medicinal das plantas: aspectos sobre o cultivo**. Campinas: RZM, 1997. 120p

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

MCMINN W.A.M, Al-Muhtaseb A.H e Magee T.R.A .Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Journal of Food Engineering**, v.38, p.505,510. 2005.

MELO, E.C.; RADÜNZ, L.L.; MELO; R.C. A. ; Influência do processo de secagem na qualidade de plantas medicinais – Revisão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.12, n.4, p.307-315, out/dez. 2004.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1995.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, n.4, p.513-518, 2005.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, v.88, n.4, p.514-521, 2008.

NASCIMENTO, V. T.; LACERDA, E. U.; MELO, J. G.; LIMA, C. S. A.; AMORIM, E. L. C.; ALBUQUERQUE, U. P. Controle de qualidade de produtos à base de plantas medicinais

comercializados na cidade do Recife-PE: erva-doce (*Pimpinella anisum* L.), quebra-pedra (*Phyllanthus spp.*), espinheira-santa (*Maytenus ilicifolia* Mart.) e camomila (*Matricaria recutita* L.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 7, n. 3, p. 56-64, 2005. Disponível em: <[http://www.ibb.unesp.br/servicos/publicacoes/rbpm/pdf\\_v7\\_n3\\_2005/artigo8\\_v7\\_n3.pdf](http://www.ibb.unesp.br/servicos/publicacoes/rbpm/pdf_v7_n3_2005/artigo8_v7_n3.pdf)>.

NAYAK, L.; PANDEY, J. P. Free energy change and monolayer moisture content of paddy and milled rice. **Journal of the Institution of Engineers**, v. 80, n. 1-3, p. 43-45, 2000.

NEGRI, M. L. S.; BERTÉ, K. S.; BOLLER, C.; POSSAMAI, J.C.; NAKASHIMA, T. Influência das temperaturas de secagem da Espinheira-santa – *Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reiss., nos teores de polifenóis. In: **V Jornada Catarinense de Plantas Mediciniais. 1ª Jornada Internacional de Plantas Mediciniais**. UNIVILLE. Joinville/SC. 2006. V. 1, p. 1882-183.

NEGRI, M. L. S. **Secagem das folhas de espinheira-santa – *Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reiss. sob diferentes temperaturas e influência nos teores de polifenóis, na atividade antioxidante e nos aspectos microbiológicos**. 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/12096/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20DEFINITIVA.pdf>>.

NKOLO MEZE'E, Y.N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpyentropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: The case of bubinga (*Guibourtia tessmanii* J.L'Eonard; *G. Pellegriniana* J.L.). **Thermochimica Acta**, v.468, n.1-2, p.1-5, 2008.

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**, v.45, n.3, p.546-554, 2010.

OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória . **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process . **Journal of Food Engineering**, v.52, n.4, p.349-357, 2002.



PRATES, M.F.O.; REIS, R.C.; DEVILLA, I.A.; FARIA, R.Q.; LIMA JUNIOR, A.F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v.14, n.3, p.514-521, 2012.

REIS, R.C.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; SERVULO, A.C.O.; SOUZA, A.B.M. Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.12, p.1346-1352, 2012.

REIS, M.S.; SILVA, S.R. **Conservação e uso sustentável de plantas medicinais e aromáticas: *Maytenus* spp., espinheira-santa**. Brasília: Ibama, 2004. p. 203.

RADÜNZ, L.L.; AMARAL, A.S.; MOSSI, A.J.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, v.19, n.1, p.19-27, 2011.

REIS, R.C.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; SERVULO, A.C.O.; SOUZA, A.B.M. Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.12, p.1346-1352, 2012.

RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, J.; BESSA, V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) grains. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 32, p. 2453-2462, 2014.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.

SILVA, S.R. ; SUELMA, R.S; XIMENA, B.; LÚCIA H.O.; MARCUS, V. M.M. **Plantas medicinais do Brasil: aspectos gerais sobre legislação e comércio**. Disponível em < [www.traffic\\_portu.pdf](http://www.traffic_portu.pdf)> ,2005.

TELIS V.R.N.; GABAS A.L.; MENEGALLI F.C e TELIS-ROMERO J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v.343, n.1-2, p,49–56, 2000.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p. 387-394, 2008.

VIEIRA, R.F. Conservation of medicinal and aromatic plants in Brazil. In: JANICK, J. (Ed.). **Perspectives on new crops and new uses**. Alexandria, VA: ASHS Press, 1999. p. 152 – 159.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Quality control methods for medicinal plant materials**. Geneva, 1998. p. 122.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.