

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

CINÉTICA DE SECAGEM DAS FOLHAS DE *Piper aduncum* L.

JEAN CARLOS DO CARMO GAUER

STANLEY STÉFANO PERIN GONELLA

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2015

CINÉTICA DE SECAGEM DAS FOLHAS DE *Piper aduncum* L.

JEAN CARLOS DO CARMO GAUER
Engenheiro Agrícola

STANLEY STÉFANO PERIN GONELLA
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
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

G266c Gauer, Jean Carlos Do Carmo

Cinética de secagem das folhas de Piper Aduncum L.: Falso-Jaborandi / Jean Carlos Do Carmo Gauer, Stanley Stéfano Perin Gonella -- Dourados: UFGD, 2015.

33f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Valdiney Cambuy Siqueira

Co-orientador: André Luis Duarte Gonelli

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

Inclui bibliografia

1. Falso-jaborandi.. 2. Modelos matemáticos.. 3. Coeficiente de difusão efetivo.. 4. Energia de ativação.. I Stanley Stéfano Perin Gonella II. 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 DAS FOLHAS DE *Piper aduncum* L.

Por

JEAN CARLOS DO CARMO GAUER

STANLEY STÉFANO PERIN GONELLA

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

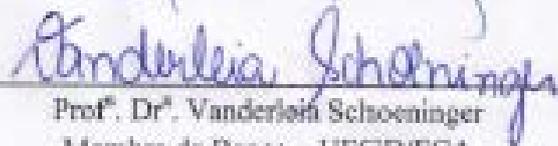
Aprovado em: 14/12/2005



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



Prof. Dr. André Luis Duarte Gonelli
Membro da Banca – UFGD/FCA



Prof. Dr. Vanderlei Schoeninger
Membro da Banca – UFGD/FCA

AGRADECIMENTOS – Jean Carlos do Carmo Gauer

A Deus por me dar a oportunidade de estar fazendo este trabalho e guiar todos meus passos até aqui.

A Universidade por toda a infraestrutura necessária ao desenvolvimento dos estudos e benefício ao curso de Engenharia Agrícola.

Aos meus pais Jacó Gauer e Deuzeli do Carmo Gauer, que sempre me apoiaram e estiveram comigo em todos os momentos dessa jornada, sempre dando incentivos, suporte, confiança e nunca me deixando desanimar.

A minha irmã Patrícia do Carmo Gauer e namorada Natany Kelem Silva, por estarem junto, me proporcionando alegria e fazendo com que a força de vontade sempre estivesse presente nos estudos.

A todos os meus familiares que sempre me passaram confiança durante a graduação.

Ao orientador Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira, que sempre esteve presente nos momentos de dúvidas e sempre passando o máximo de conhecimento em benefício do trabalho e disciplinas, e também pela amizade criada.

Ao amigo e companheiro de trabalho Stanley Stéfano Perin Gonella, por sempre estar disposto a realização dos estudos e trabalhos gerados durante o curso, e também pelas alegrias e companheirismo trazidos para junto de nós.

A Fernanda Pimentel, Larissa Capoana, Camilo Alencar e Fabio Miranda, pelo auxílio em diversos momentos durante a execução desta pesquisa.

A todos os professores do curso de Engenharia Agrícola, por sempre passarem seus conhecimentos em função de tornar-me um excelente profissional, como também para com meus companheiros de curso.

A todos os amigos adquiridos na graduação, Luan Assola, Kelvin Sávio, Marcos Sorgatto, Dener Barbiero, Guilherme Quinzane, Everson Machado, Fabricio Lima, Luiz Felipe de Andrade, Rafael Bigaton, Gilmar Machado, Alexandre Alves Gonçalves, João Marcos Turina, Guilherme Maruyama, Jessica Bonifácio e Maiara Push pelos momentos de alegria, conversas, companheirismo e apoio.

A todos que participaram dessa caminhada longa, mas que valeu a pena.

Obrigado!

AGRADECIMENTOS – Stanley Stéfano Perin Gonella

A Deus, pelo dom da vida e por guiar meus passos durante esta caminhada.

A Universidade por toda a infraestrutura necessária ao desenvolvimento dos estudos e benefício ao curso de Engenharia Agrícola.

Aos meus pais Duwaldo Pupo Gonella (*in memoriam*) e Rozeli Perin Silva, que estiveram ao meu lado perante as dificuldades desta caminhada. Obrigado pelo amor, carinho, compreensão, paciência e pelo incansável apoio e suporte para que esse sonho se realizasse.

A minha namorada Taymara Espinosa de Oliveira, 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 objetivos.

Ao meu irmão Enrique Perin Poveda, por me apoiar durante toda a graduação, pelas conversas e pelos momentos de alegria.

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.

Ao meu amigo e companheiro de trabalho Jean Carlos do Carmo Gauer, pelas conversas, sugestões, pela paciência e parceria durante a execução da pesquisa e graduação.

A Fernanda Pimentel, Larissa Capoana, Camilo Alencar e Fabio Miranda, pelo auxílio em diversos momentos durante a execução desta 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, Luan Assola, Dener Barbiero, Marcos Sorgatto, Jessica Bonifácio, Maiara Push, Everson Machado, Fabricio Lima, Kelvin Sávio, Luiz Felipe de Andrade, Rafael Bigaton e Gilmar Machado.

Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	viii
1 . INTRODUÇÃO	1
2 . OBJETIVO.....	3
3 . REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Cultura de falso-jaborandi	4
3.2 Secagem	5
3.3 Modelagem Matemática	6
3.4 Propriedades termodinâmicas	7
4 . MATERIAL E MÉTODOS	9
4.1 Influência da temperatura.....	12
4.2 Propriedades termodinâmicas	13
4.3 Análise estatística.....	13
5 . RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
5.1. Cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi.....	15
5.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo	21
5.3. Influência da temperatura.....	22
5.4. Propriedades termodinâmicas	24
6 . CONCLUSÕES.....	25
7 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

GAUER, J. C. C.; GONELLA, S. S. P. **Cinética de secagem das folhas de *Piper aduncum* L.** 2015. 33p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho avaliar a cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi (*Piper aduncum* L), em camada delgada, sob diferentes temperaturas. Aos dados de razão de umidade, foram ajustados 13 diferentes modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a cinética de secagem de produtos agrícolas. Bem como determinar o coeficiente de difusão efetivo, a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas. Durante o processo de secagem, as folhas foram colhidas com teor de água inicial de aproximadamente 78% (bu), e submetidas à secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C em um secador experimental de leito fixo, com velocidade do ar de aproximadamente 0,85 m s⁻¹ e submetidos a análise estatística para determinação da cinética de secagem e obtenção das propriedades termodinâmicas. Conclui-se que os modelos de Midilli e Valcam podem ser utilizados para representação da secagem de falso-jaborandi em camada delgada. O coeficiente de difusão efetivo aumentou com a elevação da temperatura. A energia de ativação para difusão líquida, para o intervalo de temperatura de 40 a 70 °C, durante a secagem das folhas de falso-jaborandi foi de aproximadamente 55,64 kJ mol⁻¹ obtida através da equação de Arrhenius. Os valores de entalpia e entropia específica reduzem conforme o aumento da temperatura do ar de secagem, enquanto a energia livre de Gibbs das folhas de falso-jaborandi, tiveram seus valores elevados.

Palavras-chave: Falso-jaborandi, Modelos matemáticos, Coeficiente de difusão efetivo, Energia de ativação.

1. INTRODUÇÃO

Segundo estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS), 80% de toda a população mundial, com ênfase maior nos países subdesenvolvidos, substituem necessidades médicas primárias pelo uso de plantas medicinais (RATES, 2001).

Dentre as espécies de plantas medicinais, as do gênero *Piper* tem merecido destaque, devido a sua produção de óleos essenciais, que as tornam aptas não só para fins medicinais, mas também para produção de cosméticos e inseticidas (BEZERRA et al., 2007; SILVA e MACHADO, 1999). No que diz respeito ao óleo essencial, este está sendo muito utilizado para vários tipos de tratamentos em diferentes enfermidades em vários países (PARMAR et al., 1997).

O gênero *Piper* é pertencente à família *Piperaceae*, sendo normalmente encontrado em regiões tropicais e subtropicais dentre todos os continentes. Nas Américas a família *Piperaceae*, encontra-se do México à Argentina (FIGUEIREDO e SAZIMA, 2000), e no Brasil é encontrada em cinco gêneros e próximo a valores de 460 espécies (BARROSO, 1978). Com distribuição geográfica nos Estados do Amazonas, Pará, Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Bahia, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e São Paulo (GUIMARÃES e GIORDANO, 2004).

A espécie *Piper aduncum* L., popularmente conhecida como jaborandi ou falso-jaborandi possuem compostos orgânicos de ação antifúngica que atuam na eliminação de doenças de pele e cabelos (NAVICKIENE et al., 2000). Por possuir altos teores de dilapiol em seu óleo essencial, esta planta medicinal é bastante utilizada pela sua ação estimulante da digestão do fígado e cicatrização, apresentando também compostos na ação antimicrobiana (MAIA et al., 1998).

Outro fator de suma importância para a extração do óleo essencial de *P. anducum* é o combate dos fungos do gênero *Colletotrichum musae*, responsável pela antracnose em frutos de banana (BASTOS e ALBUQUERQUE, 2004); *Trichophyton mentagrophytes* e *Trichophyton tonsurans*, que afetam a dermatoses dos mamíferos e *Magnaporthe grisea*, causadores de danos nas culturas de trigo e arroz (GUERRINI et al., 2009). O óleo extraído das folhas também apresenta atividade contra os protozoários *Leishmania amazonenses* e *Trichomonas vaginalis*, que causam doenças infecciosas em humanos (FIDALGO et al., 2004).

A secagem é um processo de suma importância para a manutenção da qualidade da maioria dos produtos agrícolas, que pode ser definido como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no produtos por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (MARTINAZZO et al., 2007).

Existem diversas as vantagens de se utilizar a secagem, como: a conservação do produto; estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo; proteção contra degradação enzimática e oxidação; redução do seu peso; economia de energia por não necessitar de refrigeração; e contribuir com condições mais adequadas de armazenamento disponibilizando o produto durante qualquer época do ano.

No processo da secagem, o fornecimento de calor é essencial para a retirada de água através da evaporação, havendo também a necessidade de um sorvedor para a remoção do vapor de água formado na superfície do material, sendo um fenômeno comum a qualquer condição de secagem. No entanto, características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. De acordo com Baritoux et al. (1992), a secagem pode aumentar o número de modificações físicas e químicas consideradas negativas, alterando assim a qualidade da matéria prima para a sua comercialização, como por exemplo, mudanças na aparência (coloração), aroma e possíveis perdas de constituintes voláteis.

A representação matemática do processo de secagem de diversos produtos agrícolas vem sendo estudado há algum tempo, sua utilização é feita na tentativa de prever os fenômenos que ocorreram durante este processo. Vários modelos matemáticos foram criados ao longo dos anos com o objetivo de projetar, controlar e otimizar unidades de secagem (ROCHA et al., 2005). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (GINER e MASCHERONI 2002; BERBERT et al., 1995;).

Segundo Resende et al. (2008), os modelos matemáticos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações detalhadas sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente.

2. OBJETIVO

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho descrever o comportamento da cinética de secagem de folhas de falso-jaborandi, selecionando o modelo matemático que melhor representa o fenômeno, além de determinar o coeficiente de difusão e as propriedades termodinâmicas do produto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cultura de falso-jaborandi

A planta é do tipo arbusto, com altura em cerca de 1,5 a 2,0 m, e 2,5 a 3,5 cm de diâmetro na base do caule. Os caules perfilhados possuem diâmetro de 1,5 a 2,0 cm, consiste em um aspecto áspero pelo fato de conter grande número de lenticelas muito protuberantes. Plantas de características angulosas, nodosas e sua coloração verde de tons claros e escuros, é quase totalmente presente na sua área, com tonalidades castanhas nas partes que teve crescimento secundário e suas regiões mais jovens pubescentes (VIANA e AKISUE, 1997).

As folhas consistem em formato oval-lanceoladas, agudas, inteiras, íntegras, com filotaxia alterna, e limbo de 10,0 a 15,0 cm de comprimento por 6,0 a 7,5 cm de largura, seu pecíolo é de 3,0 a 5,0 mm de comprimento. A estrutura da base foliar é assimétrica e cortada. O limbo é verde-escuro, bulado e com depressões nas regiões das nervuras na superfície adaxial, já na superfície abaxial se predomina uma coloração verde mais claro, com característica faveolado devido as nervuras serem proeminentes, tanto a superfície abaxial quanto a superfície adaxial são pubescentes e sua membrana é flexível (VIANNA e AKISUE, 1997).

As espécies do gênero *Piper* possuem propriedades microbianas exibidas por seus constituintes, sendo amplamente aplicadas na medicina popular. O falso-jaborandi é um excelente produtor de óleo essencial, tendo ele um alto teor de éter fenílico dilapiol de ação fungicida, larvicida e inseticida (MAIA et al., 1998). Sua composição apresenta compostos como isobutil, pirrolidina e dihidropiridone, com ação antifúngica contra *Cladosporium sphaerospermum*, causador da verrugose em algumas frutíferas (ALECIO et al., 1998), além disso, o falso-jaborandi é muito eficaz no controle de doenças humanas causadas por bactérias e fungos (SANTOS et al., 1999).

O falso-jaborandi possui amidas de ação antifúngica e é utilizado popularmente no combate a afecções da pele e cabelos (NAVICKIENE et al., 2000). São encontrados 0,5% de teor de safrol em sua composição, um fenil éter que ocorre como componente volátil, sendo utilizado como precursor na fabricação de inseticidas biodegradáveis, cosméticos e produtos farmacêuticos (SILVA e OLIVEIRA, 2000). Os produtos naturais de falso-jaborandi apresentam-se satisfatório no controle de fitopatógenos (NAIR e BURKE, 1990). Em uma ação *in vitro e in vivo*, Bastos (1997) demonstrou a ação inibitória do óleo essencial de falso-

jaborandi contra *Crinipellis pernicioso* (vassoura-de-bruxa em cacauero) e a inibição *in vitro* do crescimento micelial de vários fito patógenos e também no controle de fitomoléstias de estiolgia fúngica.

3.2 Secagem

De acordo com Soysal e Öztekin (1999), plantas medicinais e aromáticas possuem alto teor de água e alta infestação por microrganismos. Logo, para manter a qualidade do produto é necessário que se faça a secagem logo após a sua coleta, e subseqente o seu armazenamento.

A secagem de espécies medicinais consiste na preparação do produto para seu armazenamento, com intuito de suprir as necessidades de indústrias farmacêuticas de fitoterápicos, pois plantas frescas exigidas na produção industrial, não teriam estrutura para ser usadas (LORENZI e MATOS, 2002).

Para ocorrer as atividades de microrganismos, enzimas, e mecanismos metabólicos é necessário que o produto esteja com uma determinada quantidade de água disponível, com isso a secagem é um processo indispensável, reduzindo a velocidade das reações químicas e o desenvolvimento de microrganismos e beneficiando a sua conservação (CHRISTENSEN e KAUFMANN, 1974).

A secagem é definida como processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no produto por meio de evaporação (YILBAS et al., 2003). A secagem em camada delgada é a secagem do produto com espessura de apenas uma unidade. A combinação de equações matemáticas do produto em camada delgada, juntamente com equações representativas de outras propriedades físicas de um determinado produto estudado, formam um conjunto de equações matemáticas que ajudam a entender melhor os processos de cinética de secagem em camada espessa. Sendo assim entende-se que camada espessa, são unidades de camadas delgadas sobrepostas umas às outras (KASHANINEJAD et al., 2007).

Segundo Midilli et al. (2002), existem três tipos de modelos de secagem em camada delgada que visam descrever a cinética de secagem de produtos higroscópicos. Os modelos teóricos, os semi-empíricos e os empíricos. No modelo teórico geralmente considera-se as operações em condições externas do produto, sendo também considerado a transferência de energia e massa, e seus efeitos dos mecanismos internos. A água presente no interior do produto pode movimentar-se de acordo com o tipo de material que está secando, por diversos

mecanismos. Os possíveis mecanismos existentes dentro do método teórico para o transporte de umidade são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica.

Nos modelos semi-empíricos e empíricos considera-se apenas a resistência externa a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002).

Blanco (2000), ao avaliar o efeito de três temperaturas de secagem no processo de circulação forçada de ar na estufa, com o objetivo de produzir o óleo essencial presente nas folhas da menta (*Mentha arvensis* L.), obteve resultados de que nas secagens de 60 e 80°C não ocorreram diferenças significativas na quantidade de óleo extraído de sua composição, no entanto o teor produzido nas duas faixas de temperaturas (60 e 80°C) foi de 80% abaixo ao teor produzido na secagem de 40 °C.

Balbaa et al. (1974), verificou em seu trabalho, o efeito de métodos de cinética de secagem de folhas de plantas aromáticas *Digitalis lanata* (ao sol, à sombra e em três faixas de temperatura do ar em estufa: 55 à 60 °C, 90 à 95 °C e 120 à 125 °C) nos benefícios e a quantidade de glicose. Os autores concluíram que, com relação as perdas do composto o método que melhor se enquadrou foi o de secagem em estufa com faixa de temperatura de 55 à 60 °C, sendo que a secagem em sombra apresentou uma melhor coloração e aparência comparadas com as folhas secas ao sol.

3.3 Modelagem Matemática

Os modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para prever o tempo necessário para redução do teor de água do produto, sob diferentes condições de secagem, auxiliando nas tomadas de decisão e contribuindo na melhoria da eficiência do processo (ANDRADE et al., 2003).

A modelagem matemática é utilizada para representar a cinética de secagem de diversos produtos, envolvendo condições como, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar, dentre outras, durante sua perda de água, sendo fundamentais para simulações matemáticas de camadas espessas do produto. Contudo auxiliam no processo de aprimoramento e desenvolvimento de equipamentos de secagem, pois tem a função de simular o comportamento de cada produto durante a redução do teor de água, sob sucessíveis camadas delgadas (BERBET et al., 1995).

Entende-se como difusividade a facilidade da saída de água do produto. Como esta saída de água varia de acordo com mudanças de condições de secagem, no caso temperatura e velocidade do ar, pode-se entender ela como não intrínseca ao material. Assim, convencionase chama-la de difusividade efetiva. O coeficiente de difusão engloba todos os efeitos e fenômenos que possam impedir a migração de água, e está diretamente correlacionado com a difusividade efetiva, onde os valores encontrados são obtidos por ajustes experimentais (OLIVEIRA et al., 2006).

Devido ao fato de serem diversos os compostos químicos e estruturas físicas dos diferentes produtos, o mecanismo para que ocorra a difusão da água nesses produtos acarreta em grande complexidade. Em estudos de cinética de secagem envolvendo o fenômeno da difusão de água, ocorrem grandes variações nos valores do coeficiente de difusão. Além da complexidade dos produtos, também interferem as funções dos diferentes métodos de predição, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia (RESENDE et al., 2005).

Goneli et al. (2014a) utilizou em seu estudo, modelos matemáticos que descrevem a cinética de secagem de folhas de erva baleeira, realizando a secagem em diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C), sendo submetidos à análise de regressão e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas, concluindo que o modelo que mais se ajustou em seu estudo foi o de Midilli. Radünz et al. (2011) em estudo com carqueja, Prates et al. (2012) em estudo com folhas de fruta-de-lobo, Martinazzo et al. (2007) com folhas de capim limão e Reis et al. (2012) com folhas de manjeriço, também concluíram que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de cinética de secagem destas plantas medicinais.

3.4 Propriedades termodinâmicas

As propriedades termodinâmicas de adsorção de água são de suma importância para análise de projetos de equipamentos em diversos processos utilizados na preservação de produtos, como secagem, armazenamento, acondicionamento, e misturas de alimentos (IGLESIAS et al., 1976; AVIARA et al., 2004; KAYA e KAHYAOGU, 2006).

As propriedades termodinâmicas podem ser usadas na função de prever a mínima quantidade de energia requerida para desidratação do produto, fornecendo informações do estado líquido. São necessárias quando a taxa de sorção de água (absorção ou desorção) é dada em função de um processo simultâneo de transferência de calor e massa, para prever

parâmetros da cinética do fenômeno de sorção e fazer deduções aproximadas da microestrutura e das mudanças físicas que ocorrem na superfície do produto alimentício (AGUERRE et al., 1986). Propriedades termodinâmicas são obtidas através de cálculos relacionados a isothermas de sorção e suas principais funções são aquelas que quantificam as entalpias e entropias diferenciais e integrais indispensáveis em análises da dependência energética e valores preditos dos parâmetros cinéticos nos processos de sorção (KAYA e KAHYAOGU, 2006).

4. MATERIAL E MÉTODOS

As folhas de falso-jaborandi (*Piper aduncum* L.) foram coletadas nas dependências da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no horto da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA).

A coleta foi realizada de modo aleatório em dias consecutivos, no mesmo horário, desde que não houvesse orvalho na superfície foliar para evitar eventual interferência no teor de água inicial das folhas. Após a coleta, as folhas foram encaminhadas ao laboratório de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas da Faculdade de Ciências Agrárias – FCA.

No laboratório o produto foi devidamente selecionado, de forma que as folhas que apresentavam partes danificadas foram retiradas, minimizando as probabilidades de erro.

As folhas foram distribuídas em quatro bandejas de fundo telado e alocadas no interior de um secador experimental. O secador é dotado de um sistema que controla com precisão o fluxo e a temperatura do ar de secagem, e dispõe de uma série de sensores conectados a um painel de controle, visando a obtenção de um ajuste fino e o monitoramento das condições do ar de secagem.

O secador experimental de camada fixa (Figura 1) possui como fonte de aquecimento um conjunto de resistências elétricas, totalizando 12 kW de potência, um ventilador Siroco, do fabricante Ibram, modelo VSI-160, o qual possui um motor de 1 cv. O controle de temperatura é realizado por meio de um controlador universal de processos, modelo N1200, da marca Novus, trabalhando com controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), e o fluxo de ar é selecionado por meio de um inversor de frequência ligado ao motor do ventilador.

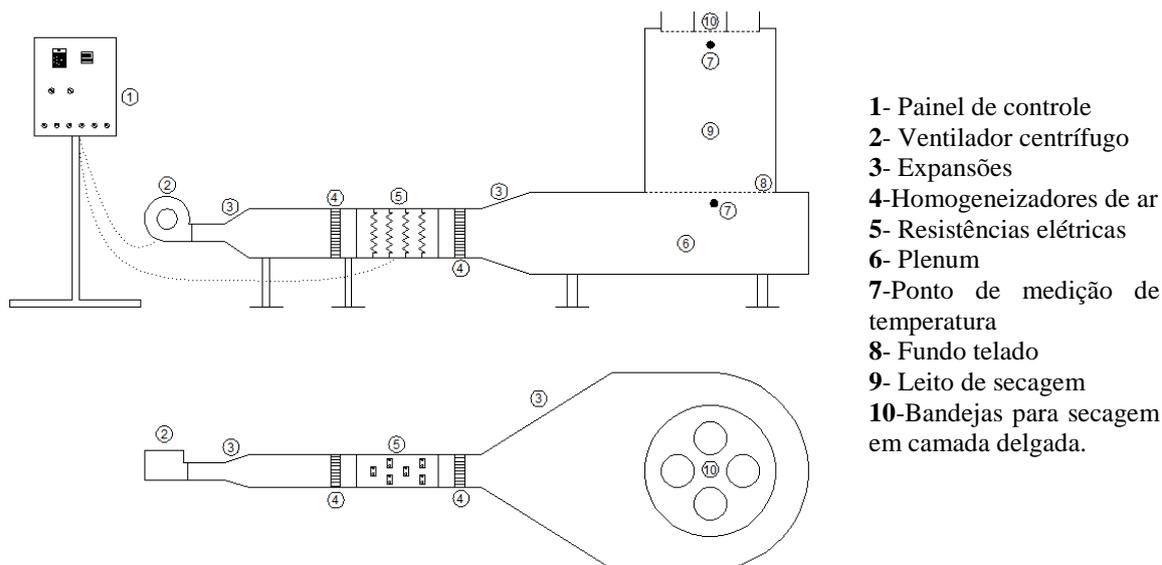


FIGURA 1. Secador experimental de camada fixa utilizado na secagem das folhas de falso-jaborandi.

Segundo Asabe (2010), o teor de água do produto por métodos de estufa, pode ser determinado através da utilização do método gravimétrico ou convecção mecânica (ar forçado). Ela deve ser aquecida eletricamente, ter controle termostático bem isolado e capaz de manter uma temperatura uniforme em toda a câmara.

O teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio das amostras, foram determinados através do método gravimétrico em estufa, a 103 ± 1 °C, durante 24 h, em quatro repetições. As temperaturas de secagem adotadas foram de: 40, 50, 60 e 70 °C, em condições controladas. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas simultaneamente ao processo de secagem, utilizando um psicrômetro instalado próximo ao equipamento de secagem. Já a velocidade do ar de secagem foi monitorada com o auxílio de um anemômetro de pás rotativas e mantida em torno de $0,85 \text{ m s}^{-1}$.

A secagem das folhas, se iniciou com teor de água de aproximadamente 78% (bu), ocorreu até atingir o teor de água de equilíbrio, ou seja, até que não fosse possível detectar variação na massa do produto, obtendo o teor final de água de 9,0 % (bu). Com as pesagens periódicas em períodos de tempo pré-estabelecidos foram obtidos os dados necessários para ajustar os modelos matemáticos por regressão não linear.

A razão de umidade das folhas de falso-jaborandi foi determinada através da seguinte expressão:

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

em que:

RX: razão de umidade do produto, adimensional;

X: teor de água do produto (decimal b.s.);

X_i: teor de água inicial do produto (decimal b.s.); e

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

Foram ajustados aos valores de razão de umidade das folhas de falso-jaborandi, treze modelos matemáticos, apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a cinética de secagem de produtos agrícolas.

Modelo	Designação do Modelo	
Dois termos	$RX = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(2)
Aproximação da difusão	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k b t)$	(3)
Exponencial de dois termos	$RX = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k a t)$	(4)
Wang e Singh	$RX = 1 + a t + b t^2$	(5)
Henderson Pabis modificado	$RX = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(6)
Henderson e Pabis	$RX = a \exp(-k t)$	(7)
Midilli	$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	(8)
Logarítmico	$RX = a \exp(-k t) + c$	(9)
Newton	$RX = \exp(-k t)$	(10)
Page	$RX = \exp(-k t^n)$	(11)
Thompson	$RX = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}}{2 b}\right)$	(12)
Verma	$RX = -a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	(13)
Valcam	$RX = a + b t + c t^{1.5} + d t^2$	(14)

em que:

t : tempo de secagem, h;

k, k₀, k₁ : parâmetros de secagem h⁻¹; e

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

Para a determinação do coeficiente de difusão efetivo para as diversas temperaturas de secagem, foi utilizado a Equação 15, fundamentado na teoria de difusão líquida, que considera uma placa plana infinita.

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

em que:

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

t : tempo de secagem, h;

L : espessura do produto, m; e

n : número de termos do modelo.

Para a obtenção da espessura (h) foi utilizado um micrômetro digital, com resolução de 0,001 mm. Para obtenção da espessura média das folhas de falso-jaborandi, utilizou-se 50 folhas escolhidas ao acaso dentre a gama de folhas que seriam secas, e realizou-se as leituras em seis pontos previamente estabelecidos, sendo estes divididos em três pontos de cada lado da nervura central da folha.

4.1 Influência da temperatura

O comportamento do coeficiente de difusão efetivo em relação às diferentes temperaturas aplicadas durante o processo de secagem foi avaliado de acordo com a equação de Arrhenius, descrita na Equação 16:

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

em que:

D_0 : fator pré-exponencial;

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

T_a : temperatura, K; e

E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} .

4.2 Propriedades termodinâmicas

Para a determinação das propriedades termodinâmicas, entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, em função do processo de cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi foram utilizadas o método descrito por Jideani e Mpotokwana (2009), pelas Equações 17, 18 e 19.

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

$$s = R \left(\ln D_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_a \right) \quad (18)$$

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

em que:

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

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

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

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

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

4.3 Análise estatística

Os dados experimentais provenientes da cinética de secagem em camada delgada de folhas de falso-jaborandi, foram analisados e submetidos à análise de regressão não linear, através do método de Gauss-Newton, empregando o software Statistica 8.0.

Para análise do grau de ajuste de cada modelo, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), do desvio padrão da estimativa (SE) e o comportamento da distribuição dos resíduos. Os valores do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE) foram calculados de acordo com as 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:

Y: valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais; e

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi

Os valores do erro médio relativo (P), do coeficiente de determinação (R^2), e do desvio padrão da estimativa (SE), são apresentados na Tabela 2.

Verifica-se que, de maneira geral, entre os modelos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem, Midilli e Valcam apresentaram valores inferiores a 10% ao erro médio relativo (P), que segundo Mohapatra e Rao (2005), indicam um bom ajuste; Os modelos de Thompson, Henderson e Pabis, Newton, Exponencial de dois termos, Verna, Henderson e Pabis, Wang e Singh, Page, Logarítmico, Aproximação da difusão e Dois termos, apresentaram valores superiores a 10%, sendo inadequados para a descrição do fenômeno. Segundo Kashaninejad et al. (2007), valores do erro médio relativo indicam o desvio dos dados observados com relação a curva estimada pelo modelo.

Observa-se na Tabela 2, que dentre os modelos utilizados para prever o fenômeno da cinética de secagem de falso-jaborandi, Wang e Singh, Page, Logarítmico, Aproximação da difusão, Midilli, e Valcam, os (R^2) obtiveram valores de coeficiente de determinação igual ou superior à 0,98, que segundo Kashaninejad et al. (2007), são bons valores para o auxílio da escolha do modelo. Já os modelos de Thompson, Henderson e Pabis, Newton, Exponencial de dois termos, Verna, Henderson e Pabis modificado e Dois termos não atenderam a este requisito.

TABELA 2. Parâmetros estatísticos obtidos para os treze modelos utilizados para representar o processo de cinética de secagem em camada delgada em diferentes temperaturas das folhas de falso-jaborandi.

Modelos	40 °C			50 °C			60 °C			70 °C		
	SE	P	R ²									
Wang e Singh	0,019	6,87	0,99	0,019	4,67	0,99	0,027	10,81	0,99	0,022	7,15	0,99
Thompson	0,049	31,12	0,97	0,050	22,19	0,96	0,083	30,30	0,92	0,112	34,14	0,86
Page	0,031	15,02	0,98	0,034	12,01	0,98	0,026	7,56	0,99	0,028	6,66	0,99
Logarítmico	0,021	12,11	0,99	0,016	6,23	0,99	0,026	10,00	0,99	0,038	6,84	0,98
Henderson e Pabis	0,047	28,97	0,97	0,048	20,69	0,97	0,071	25,48	0,94	0,096	28,98	0,90
Aproximação da difusão	0,021	10,47	0,99	0,033	12,10	0,98	0,036	12,71	0,98	0,026	7,63	0,99
Dois termos	0,021	11,50	0,99	0,050	5,33	0,97	0,035	11,84	0,98	0,024	7,06	0,99
Newton	0,021	12,11	0,99	0,049	22,19	0,96	0,081	30,30	0,92	0,109	34,14	0,86
Verna	0,191	114,5	0,60	0,033	12,10	0,97	0,028	10,83	0,99	0,025	7,50	0,99
Exponencial de dois termos	0,049	31,12	0,97	0,033	12,92	0,97	0,039	14,15	0,98	0,112	34,14	0,86
Midilli	0,013	5,40	0,99	0,017	5,77	0,99	0,015	5,07	0,99	0,012	2,76	0,99
Valcam	0,010	2,60	0,99	0,015	4,34	0,99	0,015	5,16	0,99	0,017	4,51	0,99
Henderson e Pabis modificado	0,009	2,42	0,99	0,029	10,39	0,99	0,080	25,48	0,94	0,016	3,91	0,99

Midilli e Valcam se destacam entre todos os modelos, por apresentarem os menores valores do desvio padrão (SE), para todas as condições de secagem. Draper e Smith (1998), afirmam que o desvio padrão da estimativa indica a capacidade de um modelo descrever com fidelidade um determinado processo físico, sendo que quanto menor seu valor, melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados observados.

Os modelos de Midilli e Valcam apresentaram para todas as condições de secagem uma distribuição aleatória dos resíduos, conforme observado na Tabela 3, obtendo-se assim, o melhor ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais da cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi.

TABELA 3. Tendência da distribuição dos resíduos para os treze modelos ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi: (AL) - Aleatório; (TD) - Tendencioso.

Modelos Matemáticos	Temperatura (°C)			
	40	50	60	70
Wang e Singh	AL	AL	TD	AL
Thompson	TD	TD	TD	TD
Page	TD	TD	AL	AL
Logarítmico	TD	AL	TD	TD
Henderson e Pabis	TD	TD	TD	TD
Aproximação da difusão	TD	TD	TD	AL
Dois termos	TD	TD	TD	AL
Newton	TD	TD	TD	TD
Verna	TD	TD	TD	AL
Exp. de dois termos	TD	TD	TD	TD
Midilli	AL	AL	AL	AL
Valcam	AL	AL	AL	AL
Henderson e Pabis mod.	AL	TD	TD	AL

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 e, caso o modelo apresente distribuição dos resíduos de forma tendenciosa, o mesmo não é adequado para representar o fenômeno em questão.

Na Figura 2 são apresentadas ilustrações para exemplificar a classificação da distribuição de resíduos (Aleatória para o modelo de Midilli e Tendenciosa para o modelo de Newton), durante a modelagem da cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi.

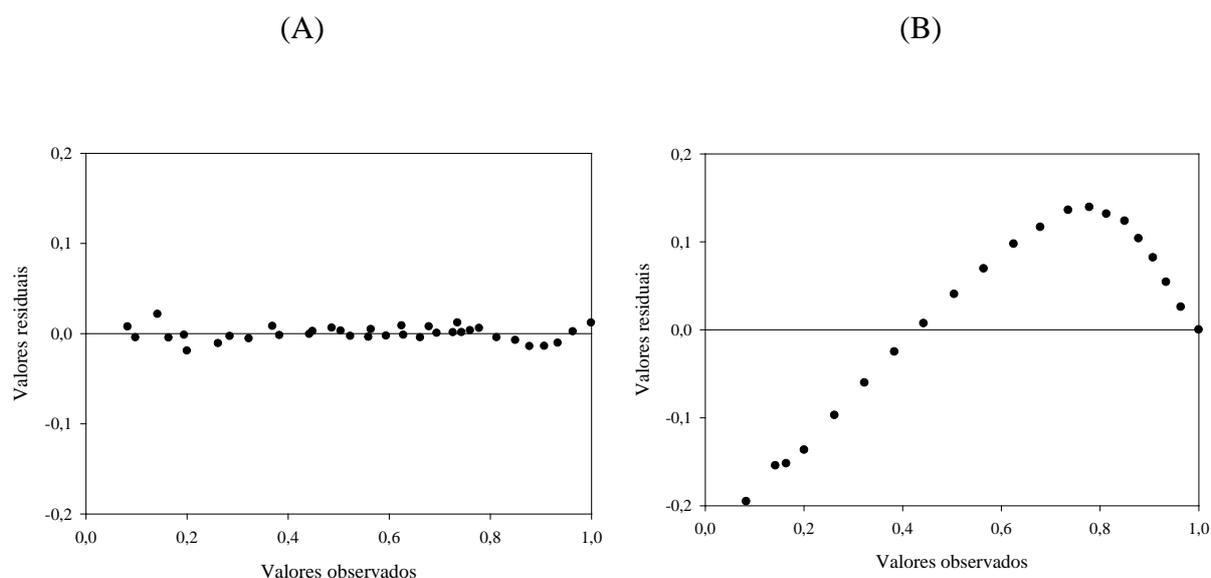


FIGURA 2. Ilustração da distribuição dos resíduos: (A) – Aleatório para o modelo de Midilli; (B) – Tendenciosa para o modelo de Newton; durante a secagem em 40°C das folhas de falso-jaborandi.

Analisando os dois modelos que atendem os requisitos estatísticos e que podem ser recomendados para a representação da cinética de secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi, o modelo mais clássico e mais recomendado é o de Midilli, sendo ele utilizado em secagens de folhas medicinais e outros produtos agrícolas em camadas delgadas como secagem de folhas de sálvia (RADÜNZ et al., 2010), folhas de capim-limão (MARTINAZZO et al., 2007), folhas de erva-cidreira-brasileira (BARBOSA et al., 2007), carqueja (RADÜNZ et al., 2011), na secagem de pimentas (DARVISHI et al., 2013), pimenta cumari (REIS et al., 2011), feijão adzuki (RESENDE et al., 2010) e nabo forrageiro (SOUZA et al., 2011).

Na Figura 3 são apresentadas as comparações entre os valores estimados e observados de razão de umidade, pelo modelo de Midilli, para todas as condições do ar de secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi, pois a curva formada pela plotagem dos dados observados e estimados pelo modelo de Midilli, acompanham uma reta com inclinação de 45°, podendo indicar o quão próximo ou preciso são os valores estimados pelo modelo, com relação aos dados observados experimentalmente.

Observa-se que para todas as temperaturas estudadas o modelo de Midilli proporcionou um bom ajuste na descrição da cinética de secagem.

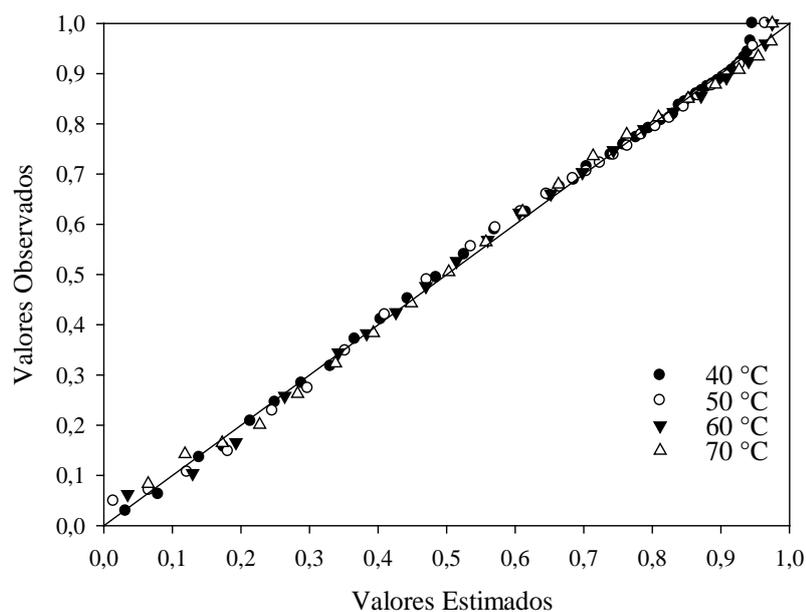


FIGURA 3. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi em camada delgada em diferentes temperaturas.

Na Figura 4 estão apresentadas as curvas de cinética de secagem em camada delgada de folhas de falso-jaborandi em diferentes temperaturas. Como previsto, ocorre um excelente ajuste do modelo, ou seja, o mesmo descreve de forma satisfatória o fenômeno da cinética de secagem. Nota-se ainda que o tempo de secagem decresce com o aumento da temperatura do ar, cujos resultados estão de acordo com estudos realizados para a secagem de diversos produtos alimentícios (MADAMBA et al., 1996; MARTINAZZO et al., 2007; MOHAPATRA e RAO, 2005).

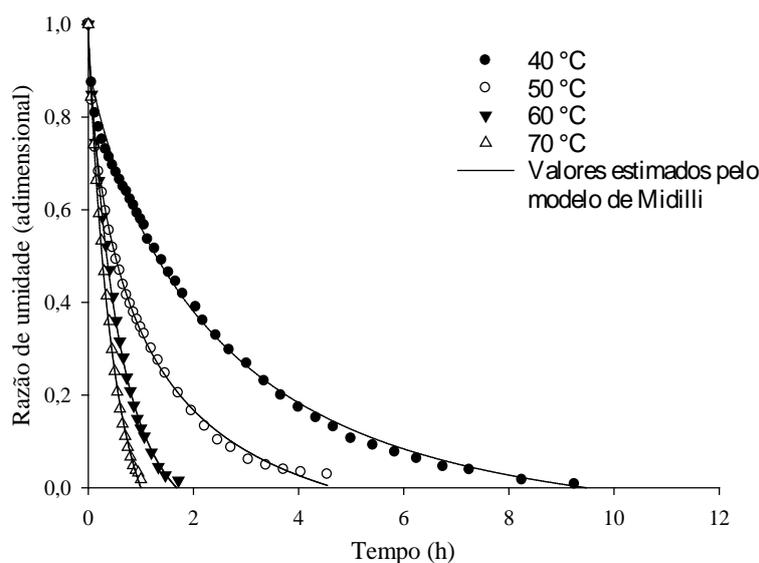


FIGURA 4. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli na cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi em camada delgada para diferentes temperaturas.

Os coeficientes e parâmetros do modelo de Midilli ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi em diferentes condições de temperatura são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Parâmetro e coeficientes do modelo de Midilli para as diferentes temperaturas de secagem das folhas de falso-jaborandi em camada delgada.

Temperatura (°C)	Parâmetro e coeficientes do modelo de Midilli			
	a	k	n	b
40	0,9277	0,4926	0,8162	-0,0045
50	0,9937	1,0441	0,6577	-0,0118
60	0,9894	1,7690	0,9448	-0,0327
70	0,9835	2,3015	0,9731	-0,0984

Observa-se na Tabela 4 que o parâmetro “k” e o coeficiente “b” do modelo de Midilli apresentaram comportamento definido conforme se aumentou a temperatura do ar de secagem; já para os coeficientes “a” e “n” não se observou tendência alguma definida.

O parâmetro “k” se relaciona com a difusividade efetiva no processo da cinética de secagem no período decrescente, onde a difusão líquida controla o processo, podendo assim ser utilizado como aproximação para caracterizar o efeito da temperatura na secagem (BABALIS e BELESSIOTIS, 2004). Conforme aumenta-se a magnitude dos parâmetros “k” em relação ao aumento da temperatura do ar de secagem, eleva-se também a difusividade

efetiva, ou seja, quanto maior a magnitude do parâmetro “k” maior a difusividade efetiva no processo de cinética de secagem.

Devido ao aumento progressivo do parâmetro “k” e coeficiente “b” com o aumento da temperatura do ar de secagem, seus comportamentos podem ser descritos pelas seguintes Equações 22 e 23. Onde observa-se bom ajuste, com os valores dos coeficientes de determinação, sendo de 0,9964 para o parâmetro “k” e 0,8355 para o coeficiente “b”.

$$k = 0,0615x - 1,9816 \quad R^2 = 0,9964 \quad (22)$$

$$b = -0,003x + 0,1296 \quad R^2 = 0,8355 \quad (23)$$

Utilizando as Equações 22 e 23 e os valores médios dos coeficientes “a” e “n” do modelo de Midilli, para todas as condições do ar de secagem, pode-se estimar o teor de água do produto por meio da seguinte expressão:

$$X = X_e + (X_i - X_e) \left\{ 0,9735 \exp \left[-(0,0615x - 1,9816) t^{0,8479} \right] + (-0,003x + 0,1296t) \right\} \quad (24)$$

em que:

x : temperatura do ar de secagem, °C.

5.2. Determinação do coeficiente de difusão efetivo

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi para as diferentes condições de temperatura do ar, considerando a área foliar média de 0,00807 m².

TABELA 5. Valores do coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem para as folhas de falso-jaborandi.

Temperatura (°C)	D x 10 ⁻¹¹ (m ² s ⁻¹)
40	0,0466
50	0,1049
60	0,2061
70	0,2940

Observa-se na Tabela 5, que os coeficientes de difusão efetivo aumentam com o incremento da temperatura. Comportamento semelhante foi observado por Martinazzo et al. (2007); Prates et al. (2012); Goneli et al. (2014b) ao estudarem a cinética de secagem de

plantas medicinais. Os autores destacam que quando se eleva a temperatura, as moléculas de água aumentam seu nível de vibração, diminuindo assim sua viscosidade, a qual é uma medida da resistência do fluido de escoamento. Desse modo, 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.

Verifica-se na Tabela 5, que as variações do coeficiente de difusão efetivo para as folhas de falso-jaborandi em diferentes temperaturas de secagem, ficaram entre $0,0466 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,2940 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Segundo Madamba et al. (1996), os valores de coeficiente de difusão para a cinética de secagem de produtos agrícolas, apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Assim os valores do coeficiente de difusão efetivo obtidos para o falso-jaborandi se enquadram a faixa estabelecida pelos autores.

Ao estudarem a cinética de secagem de folhas de aroeira (GONELI et al., 2014a) e de erva baleeira (GONELI et al., 2014b), os autores verificaram que a variação do coeficiente de difusão efetivo de $0,1476 \times 10^{-11}$ a $1,5811 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e de $1,1294 \times 10^{-11}$ a $9,4933 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, ambas para uma faixa de temperatura de 40 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Verifica-se que, em ambos os casos a faixa de variação do coeficiente de difusão é efetivo é maior. Este comportamento pode estar relacionado a característica morfológica das folhas. Em média a espessura das folhas de falso-jaborandi foi de $0,1687 \text{ mm}$, enquanto que a de aroeira e da erva baleeira foi de $0,3631$ e $0,6623 \text{ mm}$, respectivamente. No entanto, é importante salientar que a composição química também deve ser levada em consideração.

5.3. Influência da temperatura

Na Figura 5 estão apresentados os valores de $\ln(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta obtido para as folhas de falso-jaborandi. Observa-se que a linearidade decrescente evidencia a uniformidade de variação da taxa de secagem dentro da faixa de temperatura estudada. A inclinação da curva de representação de Arrhenius fornece uma relação E_a/R enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 .

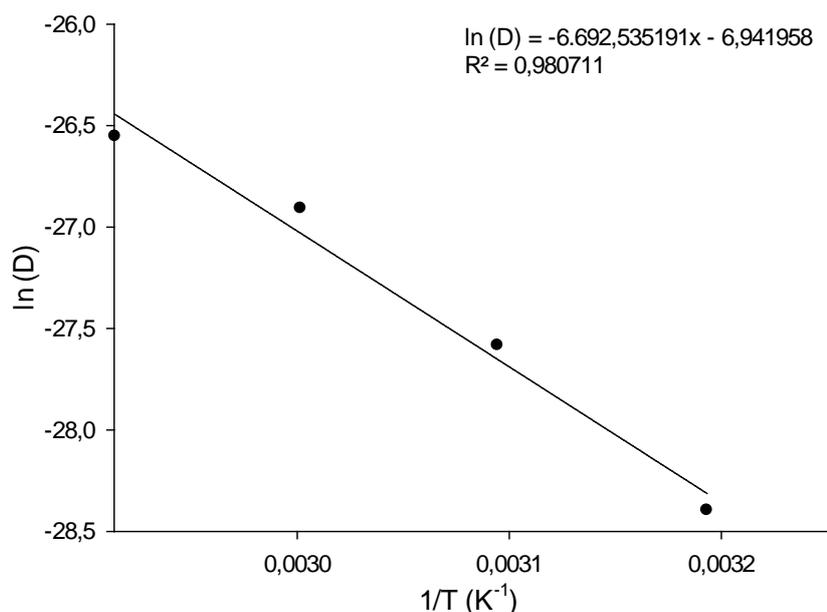


FIGURA 5. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas durante a secagem das folhas de falso-jaborandi em camada delgada.

Na equação 25 estão apresentados os coeficientes da equação de Arrhenius ajustados para o coeficiente de difusão efetivo das folhas de falso-jaborandi, calculados de acordo com a equação 16.

$$D_{ef} = 0,9663 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{55,6417}{R T_a}\right) \quad (25)$$

A energia de ativação para a difusão da água durante a cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi foi de 55,64 kJ mol⁻¹. A energia de ativação em relação a produtos agrícolas vem sendo estudada por vários autores para diversas folhas de plantas medicinais como: folhas de aroeira, 74,96 kJ mol⁻¹ (GONELI et al., 2014b); folhas de capim-limão, 63,47 kJ mol⁻¹ (MARTINAZZO et al., 2007); folhas de erva-cidreira-brasileira, 31,79 kJ mol⁻¹ (BARBOSA et al., 2007); folhas de menta, 62,96 kJ mol⁻¹ (Doymaz, 2006). Segundo Zogzas et al. (1996) os valores de energia de ativação para produtos agrícolas variam de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹. Assim a energia de ativação calculada para o falso-jaborandi no presente estudo, encontra-se dentro da faixa de variação estabelecida por esses autores.

5.4. Propriedades termodinâmicas

Na Tabela 6 são apresentados os valores das propriedades termodinâmicas, entalpia específica (h), entropia específica (s) e a energia livre de Gibbs (G), calculadas durante o processo de secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi.

TABELA 6. Propriedades termodinâmicas do processo de cinética de secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi.

T (°C)	h (kJ mol ⁻¹)	s (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	G (kJ mol ⁻¹)
40	53,0381	-0,3030	147,9350
50	52,9549	-0,3032	150,9666
60	52,8718	-0,3035	154,0008
70	52,7887	-0,3037	157,0375

Observa-se que os valores da entalpia específica diminuem com o acréscimo dos valores de temperatura. Pode se justificar que menores valores de entalpia indicam menor energia necessária para remover a água ligada ao produto durante a cinética de secagem, quando há interação das moléculas de água com os constituintes do produto. Esse comportamento está associado ao coeficiente de difusão efetivo (Tabela 5). Segundo Goneli et al. (2010), a energia necessária para remoção de água dos produtos, que ocorre por difusão no processo de secagem é composta pela entalpia de vaporização da água livre e entalpia de vaporização da água no produto (calor isostérico).

Ao se analisar a variação dos valores da entropia específica (Tabela 6), pode se observar comportamento semelhante ao da entalpia, ou seja, a entropia reduziu com o aumento da temperatura do ar de secagem. Este comportamento já era um fenômeno esperado, pois com a diminuição da temperatura, ocorre uma menor excitação das moléculas de água resultando em um aumento da ordem do sistema água-produto (CORRÊA et al., 2010).

Segundo Nkolo Meze'e et al. (2008), para que os locais de sorção em produtos agrícolas estejam disponíveis, necessita-se a atribuição da energia livre de Gibbs, tendo esta a característica de medir a capacidade que um sistema possui de realizar trabalho. Por serem valores positivos, entende-se que, a cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi não ocorre de maneira espontânea. Ou seja, é necessária a inserção de energia externa ao produto para que o processo aconteça. Neste caso, entende-se como energia externa o ar aquecido.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

Os modelos de Midilli e Valcam são adequados para a representação da cinética de secagem em camada delgada das folhas de falso-jaborandi.

O coeficiente de difusão efetivo aumenta de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem das folhas de falso-jaborandi apresentando valores entre 0,0466 e 0,2940 x $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

A relação do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão durante a cinética de secagem das folhas de falso-jaborandi de $55,64 \text{ kJ mol}^{-1}$.

O aumento da temperatura do ar de secagem promove redução dos valores de entalpia e entropia específica, enquanto os valores da energia livre de Gibbs apresentaram comportamento oposto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. Enthalpy entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. **Journal of Food Science**, v. 51, n. 6, p. 1547-1549, 1986.

ALECIO, A. C.; SILVA, B. V.; YOUNG, M. C. M.; KATO, M. J.; FURLAN, M. Antifungal amide from leaves of *Piper hispidum*. **Journal of Natural Products**, v. 61, n. 5, p. 637-639, 1998.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M.; HARDOIM, P. R. Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. **Revista Brasileira de Armazenamento – Especial Café**, v. 1, n. 7, p. 37-43, 2003.

ASABE, S. J. 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**, p.684-685, 2010.

AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; ONI, S. A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 2, p. 179-190, 2004.

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

BALBAA, S. I.; HILAL, S. H.; HAGGAG, M. Y. Effect of the use of different methods of drying of *Digitalis lanata* leaves on their quality and glicosidal content. **Planta Medica**, v. 26, n. 1, p. 20–25, 1974.

BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of Brazilian lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (MILL) N. E. BROWN). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 9, n. 1, p. 73-82, 2007.

BARITAU, O.; RICHARD, H.; TOUCHE, J.; DERBESY, M. Effects of drying and storage of herbs and spices on the essential oil. Part I. Basil, *Ocimum basilicum* L. **Flavour and Fragrance Journal**, v. 7, p. 267-271, 1992.

BARROSO, G. M.; GUIMARÃES, E. F.; ICHASO, C. L. F.; COSTA, C. G.; PEIXOTO, A. L. Sistemática de angiospermas do Brasil. **Livros Técnicos e Científicos**, v. 1, p. 45-62, 1978.

BASTOS, C. N. Efeito do óleo de *Piper aduncum* sobre *Crinipellis perniciosa* e outros fungos fitopatogênicos. **Fitopatologia Brasileira**, v. 22, n. 3, p. 441-443, 1997.

BASTOS, C. N.; ALBUQUERQUE, P. S. B. Efeito do óleo essencial de *Piper aduncum* no controle em pós-colheita de *Colletotrichum musae* em banana. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 5, p. 555-7, 2004.

BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; FILHO, J. B. P. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.

BEZERRA, D. P.; MILITÃO, G. C. G.; CASTRO, F. O.; PESSOA, C.; MORAES, M. O.; SILVEIRA, E. R.; LIMA, M. A. S.; ELMIRO, M. J. F.; COSTA-LOTUFO, L. V. Piplartine induces inhibition of leukemia cell proliferation triggering both apoptosis and necrosis pathways. **Toxicology in Vitro**, v. 21, n. 1 p. 1-8, 2007.

BLANCO. Influência da temperatura de secagem no teor e na composição química do óleo essencial de alecrim. In: Congresso Brasileiro de Olericultura, 40, 2000, São Pedro. **Anais...** São Pedro: [s.n.], v. 18, p. 903-905, 2000.

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

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.

DARVISHI, H.; ASL, A. R.; AGHARI, A.; AZADBAKHT, M.; NAJAFI, G.; KHODAEI, J. Study of the drying kinetics of pepper. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, J. Saudi Soc. For Agric. Sci**, 2013.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying behavior of mint leaves. **Journal of Food Engineering**, v. 74, p. 370-375, 2006.

DRAPER, N. R.; SMITH, D. H. Applied regression analysis. 3.ed. **New York John: Wiley e Sons**, , p. 712, 1998.

FIDALGO, L. M.; RAMOS I. S.; ALVAREZ, A. M. M.; LORENTE, N. G.; LIZAMA, R. S.; PAYROL, J. A. Propiedades antiprotozoarias de aceites esenciales extraídos de plantas cubanas. **Revista Cubana de Medicina Tropical**, v. 56, n. 3, p. 230-233, 2004.

FIGUEIREDO, R. A.; SAZIMA, M. Pollination biology of Piperaceae species in southeastern Brazil. **Annals of Botany**, v. 85, p. 455-460, 2000.

GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Postharvest Technology**, v. 81, n. 1, p. 85-97, 2002.

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

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.; NASU, A. K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W. D.; SARATH, K. L. L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira *Cordia verbenacea* D.C. **Revista Brasileira Plantas Medicinas**, v. 16, n. 2, p. 434-443, 2014a.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. D. C.; VILHASANTI, H. D. C. B.; 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, 2014b.

GUERRINI, A.; SACCHETTI, G.; ROSSI, D.; PAGANETTO, G.; MUZZOLI, M.; ANDREOTTI, E.; TOGNOLINI, M.; MALDONADO, M. E.; BRUNI, R. Bioactivities of *Piper aduncum* L. and *Piper obliquum* Ruiz e Pavon Piperaceae essential oils from eastern ecuador. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 27, n. 1, p. 39-48, 2009.

GUIMARÃES, E. F.; GIORDANO, L. C. S. Piperaceae do nordeste brasileiro estado do Ceará. **Rodriguésia**, v. 55, n. 84, p. 21-46, 2004.

IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J.; VIOLLAZ, P. Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root. **Journal of Food Technology**, v. 11, n. 1, p. 91-101, 1976.

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.

KAYA, S.; KAHYAOGU, T. Influence of dehulling and roasting process on the thermodynamics of moisture adsorption in sesame seed. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 2, p. 139-147, 2006.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, p. 512, 2002.

MADAMBBA, 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.

MAIA J. G. S.; ZOHHBI, M. G. B.; ANDRADE, E. H. A.; SANTOS, A. S.; SILVA, M. H. L.; LUZ, A. I. R.; BASTOS, C. N.; SILVA, M. H. L. Constituents of the essential oil of *piper aduncum* L. **Flavour and Fragrance Journal**, v. 13, n. 14, p. 269-272, 1998.

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

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

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.

NAIR, M. G.; BURKE, B. A. Antimicrobial *Piper* metabolite and related compounds. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 38, p. 1093-1906, 1990.

NAVICKIENE, H. M. D.; ALÉCIO, A. C.; KATO, M. J.; BOLZANI, V. S.; YOUNG M. C. M.; CAVALHEIRO, A. J.; FURLAN, M. **Antifungal amides from *Piper hispidum* and *Piper tuberculatum***. *Phytochemistry*, v. 55, n. 6, p. 621-626, 2000.

NKOLO MEZE'E, Y. N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpy-entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: the case of Bubinga (*Guibourtia Tessmanii* J. *Pellegriniana* J. L.). **Thermochimica Acta**, v. 468, n. 3-4, p. 1-5, 2008.

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.

PARMAR, V. S.; JAIN, S. C.; BISHT, K. S.; JAIN, R.; TANEJA, P.; JHA, A.; TYAGI, O. D.; PRASAD, A. K.; WENGEL, J.; OLSEN, C. E.; BOLL, P. M. **Phytochemistry of the genus *Piper***. *Phytochemistry*, v. 46, n. 4, p. 597-673, 1997.

PRATES, M. F. O.; REIS, R. C.; DEVILLA, I. A.; FARIA, R. Q.; LIMA, A. F. J. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. S. T. H. fruta-de-lobo. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 14, n. 3, p. 514-521, 2012.

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

RADÜNZ, L. L.; MOSSI, A. J.; ZAKRZEWSKI, C. A.; AMARAL, A. S.; GRASSMANN, L. Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 979-986, 2010.

RATES, S. M. K. Plants as source of drugs. **Toxicon**, v. 39, n. 5, p. 603-613, 2001.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; REIS, J. S.; DEVILA, I. A.; ASCHER, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 347-353, 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.; 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.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINAZZO, A. P.; RIBEIRO, R. M. Contração volumétrica na difusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 30, n. 2, p. 163-171, 2005.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P.; Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

ROCHA, D.C.; SANTOS, B.M.; SCHEID, C.M.; CALÇADA, L.A. Determinação dos coeficientes de difusão e convectivo na Secagem de sementes de *Nasturtium officinale* (agrião). In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, v. 6, 2005.

SANTOS, E. C. T.; RODRIGUES, J. M.; MOREIRA, D. L.; KAPLAN, M. A. C.; BERGMANO, B. R. Activies of 2-6 dihydroxy-4-methoxychalcone by entrapment in poly D. L. lactide nanoparticles. **Antimicrobial Agents and chemotherapy**, v. 43, p. 1776-2778, 1999.

SILVA, A. C. P. R.; OLIVEIRA, M. N.; Caracterização botânica e química de três espécies do gênero *Piper* no Acre. **Embrapa Acre. Boletim de pesquisa**, v. 23, p. 13, 2000.

SILVA, E. M. J.; MACHADO, S. R. Estrutura e desenvolvimento dos tricomas secretores em folhas de *Piper regnellii* M. C. DC. var. *regnellii* *Piperaceae*. **Revista Brasileira Botânica**, v. 22, p. 117-124, 1999.

SOUZA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SOYSAL, Y.; ÖZTEKIN, S. Equilibrium moisture content equations for some medicinal and aromatic plants. **Journal agricultural research**, v. 74, n. 3, p. 317- 324, 1999.

VIANNA, W. O.; AKISUE, G. Caracterização morfológica de *Piper aduncum* L. Lecta, **Bragança Paulista**, v. 15, n. 1-2, p. 11-62, 1997.

YILBAS, B. S.; HUSSAIN, M. M.; DINCER, I. Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. **Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 5-6, p. 471-476, 2003.

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.

