

**Modelagem matemática da secagem de resíduo de acerola em forno de micro-ondas****Mathematical modeling of acerola residence in microwave**

DOI: 10.34188/bjaerv3n3-095

Recebimento dos originais: 20/05/2020

Aceitação para publicação: 20/06/2020

**Ana Paula Moisés de Sousa**

Doutoranda em Engenharia Agrícola

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: Rua Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande - PB, Brasil

E-mail: anapaulinha\_15\_6@hotmail.com

**Ana Regina Nascimento Campos**

Doutora em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia

Endereço: Rua Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande - PB, Brasil

E-mail: arncampos@ufcg.edu.br

**Antonio Daniel Buriti de Macedo**

Doutorando em Engenharia de Processos

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: Rua Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, Campina Grande - PB, Brasil

E-mail: daniel\_buritt@hotmail.com

**Danilo Lima Dantas**

Doutorando em Química Pura e Aplicada

Instituição: Universidade Federal Rural de Pernambuco

Endereço: Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n - Bairro Dois Irmãos, Recife - PE, Brasil

E-mail: danilold.15@gmail.com

**Aline Priscila de França Silva**

Graduada em Licenciatura em Química pela Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: Acesso Professora Maria Anita Furtado Coelho, s/n, Sítio Olho d'Água da Bica, Cuité – PB, Brasil

E-mail: alinepriscila33@gmail.com

**Jaciara Dantas Costa**

Mestre em Ciências Naturais e Biotecnologia pela Universidade Federal de Campina Grande

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande

Endereço: Acesso Professora Maria Anita Furtado Coelho, s/n, Sítio Olho d'Água da Bica, Cuité – PB, Brasil

E-mail: dantasjaciara@gmail.com

**Renato Alexandre Costa de Santana**

Doutor em Engenharia de Processos pela Universidade Federal de Campina Grande

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde

Endereço: Acesso Professora Maria Anita Furtado Coelho, s/n - Sítio Olho d'Água da Bica, Cuité - PB, Brasil

E-mail: renatoacs@ufcg.edu.br

**RESUMO**

A acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) é uma fruta amplamente cultivada no nordeste brasileiro, bastante apreciada por sua polpa ácida, sendo a parte mais aproveitada na forma *in natura* ou processada. Assim, há uma produção significativa de resíduos que não são explorados e, portanto, é de interesse científico e tecnológico o desenvolvimento de estratégias para agregar valor econômico a esses resíduos. A secagem por forno de micro-ondas (FMO) tem sido estudada ao longo dos últimos anos e tem se mostrado uma tecnologia promissora. A cinética de secagem em FMO e o ajuste de modelos matemáticos já foram estudados para diversos produtos agrícolas, no entanto, poucos estudos exploraram a acerola e seu resíduo. Desta forma, a obtenção de um modelo matemático que represente satisfatoriamente os dados experimentais, é de suma importância para minimizar as alterações promovidas pela secagem em FMO, obtendo-se, produtos de qualidade. Portanto, objetivou-se com o presente trabalho, descrever a cinética de secagem do resíduo de acerola em FMO, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. As equações de Newton, Page, Henderson e Pabis, Logarítimo e Midilli foram ajustadas aos dados experimentais e avaliadas segundo o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o desvio quadrático médio (DQM). Os modelos propostos se ajustaram bem aos dados experimentais, porém o melhor foi o de Midilli, por apresentar maior  $R^2$  e menor DQM, indicando que este modelo representa satisfatoriamente o fenômeno de secagem de resíduo de acerola em FMO. O processo de desidratação em FMO tanto reduziu o tempo de secagem quando comparado a outros métodos convencionais, como também reduziu o teor de água final apresentado pelo resíduo. Portanto, o estudo da cinética de secagem e o ajuste de modelos matemáticos podem ser aplicados para o resíduo de acerola, contribuindo para a otimização do processo em FMO.

**Palavras-chave:** Acerola, resíduo, cinética de secagem, forno de micro-ondas, modelos matemáticos

**ABSTRACT**

Acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) is a fruit widely cultivated in northeastern Brazil, much appreciated for its acidic pulp, which is the part most used in its fresh or processed form. Thus, there is a significant production of waste that is not explored and, therefore, it is of scientific and technological interest to develop strategies to add economic value to this waste. Microwave oven drying (MW) has been studied over the past few years and has shown to be a promising technology. The drying kinetics in MW and the adjustment of mathematical models have already been studied for several agricultural products. However, few studies have explored acerola and its residue. In this way, obtaining a mathematical model that satisfactorily represents the experimental data, is of paramount importance to minimize the changes promoted by drying in MW, obtaining quality products. Therefore, the aim of the present work was to describe the drying kinetics of the acerola residue in MW and to adjust different mathematical models to the experimental data. Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarítimo, and Midilli equations were adjusted to experimental data and evaluated according to the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the mean square deviation (DQM). The proposed models fit well with the experimental data and the best one was that of Midilli, as it has a higher  $R^2$  and lower DQM, indicating that this model satisfactorily represents the drying phenomenon of acerola residue in MW. The dehydration process in MW both reduced the drying time when compared to other conventional methods and reduced the final water content presented by the residue.

Therefore, the study of drying kinetics and the adjustment of mathematical models can be applied to the acerola residue, contributing to the optimization of the MW process.

**Keywords:** Acerola, acerola residue, drying kinetics, microwave oven, mathematical models

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se por sua biodiversidade, podendo encontrar distintas frutas com grande potencial para consumo e propriedades importantes para a saúde e alimentação. Devido ao sabor de destaque e ao teor nutricional, a acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) é uma delas. Esta fruta tropical, originária dos países da América, é apreciada por sua polpa ácida, sendo a parte mais aproveitada em termos comerciais, usada *in natura*, na forma de suco ou como matéria-prima para elaboração de produtos derivados como compotas, geleias, licores, sorvetes, balas, barras nutritivas, néctares, entre outros (FREITAS et al., 2006; SEGTOEWICK et al., 2013).

Amplamente cultivada na região Nordeste do país, a maior parte da produção de acerola é absorvida pela indústria de processamento, pois o período de vida útil é curto após a colheita, devido às reações bioquímicas de deterioração que comprometem a qualidade do fruto. Sendo assim, o processamento visa potencializar sua durabilidade, além de facilitar o transporte e agregar valor ao produto (ALVES et al., 2010). Em consequência, a geração de resíduos, constituídos de semente, casca e bagaço, tornou-se significativa (ARAÚJO, 2017).

Os resíduos, entre 15 e 41% do volume total de toda acerola processada, ainda são pouco explorados e, portanto, é de interesse científico e tecnológico o desenvolvimento de estratégias para agregar valor econômico (BRAGA et al., 2011). A secagem, por ser o processo mais utilizado na preservação da qualidade e estabilidade de produtos alimentícios, representa uma alternativa viável de aproveitamento dos resíduos, podendo gerar um material com potencial aplicação na indústria alimentícia (MOURA, 2016).

A secagem por forno de micro-ondas (FMO) tem sido estudada ao longo dos últimos anos e tem se mostrado uma tecnologia promissora. A utilização dessa tecnologia se mostra mais eficiente na realização da secagem, pois o tempo de operação é bastante reduzido em comparação a outros métodos, promovendo menor perda da qualidade do produto, o que motiva o emprego do aparelho de micro-ondas doméstico (MATA et al., 2014). A cinética de aquecimento e secagem, bem como a interação do campo eletromagnético com o material a ser aquecido está diretamente associada às propriedades dielétricas que interagem com o material como um todo, facilitando a secagem e favorecendo um melhor transporte de água (TELÖKEN, 2016).

A secagem pode ser descrita por modelos matemáticos, que permitem a obtenção de estimativas do tempo necessário para a perda de água do produto, tornando-se ferramentas úteis para as tomadas de decisão e contribuem para a melhoria da eficiência do processo (KADAM; BALASUBRAMANIAN, 2011; MEZIANE, 2011; SOUSA et al., 2011, ARAÚJO et al., 2017). Os modelos matemáticos de Newton (O'CALLAGHAN; MENZIES; BAILEY, 1971), Page (1949), Henderson e Pabis (1962), Logarítimo (YAGCIOGLU et al., 1999) e Midilli et al. (2002) são largamente adotados em processos de secagem.

A cinética de secagem em FMO e o ajuste de modelos matemáticos já foram estudados para diversos produtos agrícolas, tais como cenoura (*Daucus carota* L.) (ANDREOLA et al., 2013), feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp) (MATA et al., 2014), vagem de algaroba (*Prosopis juliflora* (S.w.) D.C.) (COSTA et al., 2016), casca de jaca (SOUSA et al., 2016), porém poucos estudos exploraram a acerola e seu resíduo.

Desta forma, a obtenção de um modelo matemático que represente satisfatoriamente os dados experimentais, é de suma importância para minimizar as alterações promovidas pela secagem, obtendo-se, produtos de qualidade (MENDONÇA et al., 2015). Portanto, objetivou-se com o presente trabalho, descrever a cinética de secagem do resíduo de acerola em FMO, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais.

## 2 METODOLOGIA

Foi adquirido resíduo de acerola em uma indústria de polpas de frutas no município de Nova Floresta-PB, durante o período de agosto de 2017, e conduzido até o Laboratório de Bioquímica e Biotecnologia de Alimentos, Centro de Educação e Saúde (CES), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A secagem das amostras de resíduo foi realizada em um forno de micro-ondas (2450 MHz e 700 W), com potência de 80%, e massa de amostra de 50 g. Antes e após o início de cada secagem, foram retiradas amostras para determinação do teor de água, conforme metodologia descrita em IAL (2008). O experimento foi realizado em duplicata, sendo as pesagens dos resíduos obtidas em balança semi-analítica. As leituras contínuas em relação à perda de massa de cada amostra foram realizadas em intervalos regulares, sendo de 2 minutos, até que as amostras atingissem massa constante.

A razão de teor de água (RX) é definida como sendo a diferença entre o teor de água, em base seca, em um dado tempo de secagem, e o teor de água de equilíbrio, dividida pela diferença entre o teor de água no início da secagem e o teor de água de equilíbrio. Portanto, as curvas de secagem foram

obtidas pela conversão dos dados referentes à perda de água no parâmetro adimensional RX, realizados para cada intervalo de tempo, conforme Equação 1.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

em que:

RX - razão de teor de água, adimensional;

X - teor de água, base seca, b.s;

X<sub>e</sub> - teor de água de equilíbrio, b.s; e

X<sub>0</sub> - teor de água inicial, b.s.

Para o ajuste dos modelos matemático das curvas de secagem de resíduo de acerola aos dados experimentais, utilizaram-se as equações descritas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Modelos de regressão não-linear aplicados às curvas de secagem de resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), em forno de micro-ondas

Modelo	Equação
Newton	$RX = \exp(-k.t)$ (2)
Page	$RX = \exp(-k.t^n)$ (3)
Henderson e Pabis	$RX = a.\exp(-k.t)$ (4)
Logarítimo	$RX = a.\exp(-k.t)+c$ (5)
Midilli	$RX = a.\exp(-k.t^n)+b.t$ (6)

RX - Razão de teor de água, adimensional; a, b, c, k, n, - Parâmetros do modelo, adimensional; t - Tempo de secagem, min.

Para os ajustes dos dados experimentais, realizaram-se as análises de regressão não-linear pelo método Quasi-Newton, empregando-se o *software* Statistica 8.0. Os critérios de avaliação utilizados para a escolha dos modelos foram o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e o desvio quadrático médio (DQM), calculado pela Equação 7 (SANTOS et al., 2016).

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (R_{x_{exp}} - R_{x_{pre}})^2}{N}} \quad (7)$$

em que:

DQM - desvio quadrático médio;

RX<sub>exp</sub> - razão de teor de água experimental;

RX<sub>pre</sub> - razão de teor de água predito;

N - número de dados experimentais.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos parâmetros dos modelos de Newton, Page, Henderson e Pabis, Logarítimo e Midilli ajustados aos dados experimentais das curvas de cinéticas de secagem de resíduo de acerola em FMO, com os correspondentes  $R^2$  e DQM estão representados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste dos modelos das curvas de cinética de secagem de resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), em forno de micro-ondas

Modelos	Parâmetros					$R^2$	DQM
	a	k	b	c	n		
Newton	-	0,176	-	-	-	0,982	0,067
Page	-	0,077	-	-	1,437	0,997	0,028
Henderson e Pabis	1,056	0,185	-	-	-	0,985	0,062
Logarítimo	1,381	0,101	-	0,367	-	0,998	0,010
Midilli	0,997	0,091	0,007	-	1,244	0,999	0,006

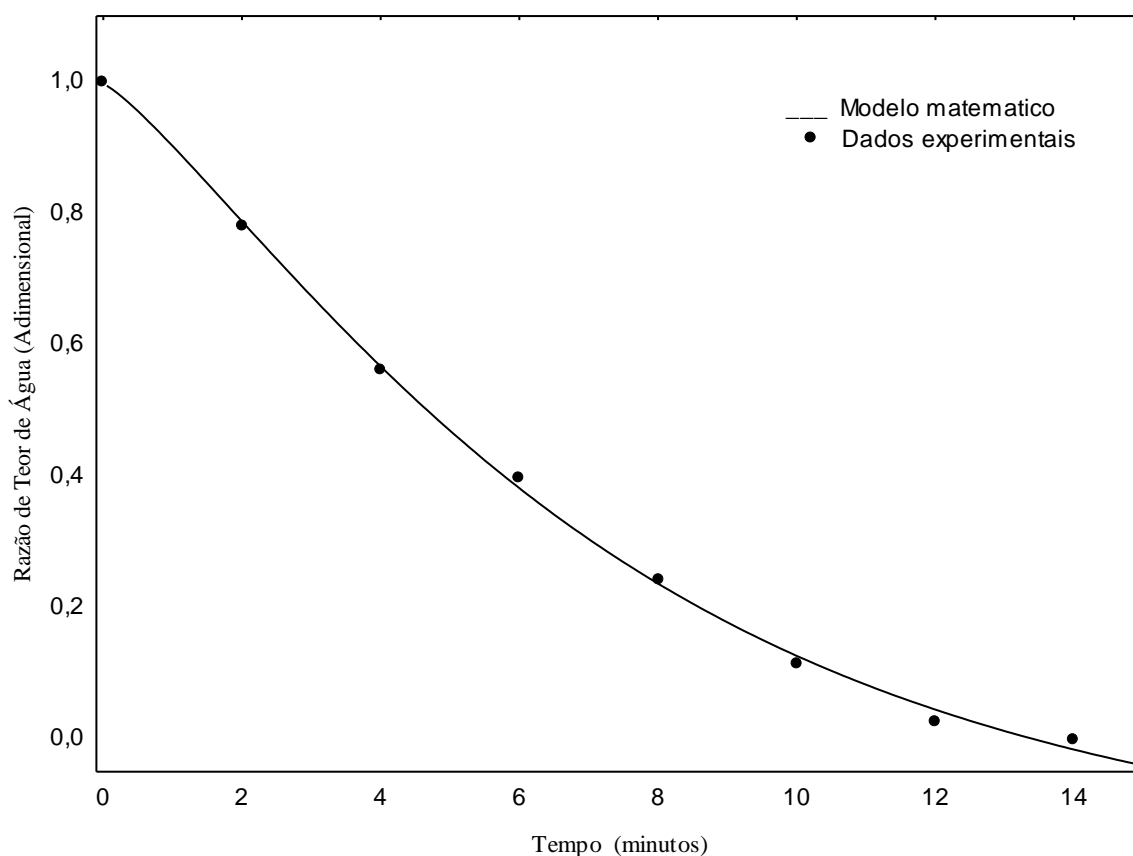
O melhor modelo para a secagem apresenta valor de  $R^2$  ajustado e valor de DQM o mais próximo de um e zero, respectivamente. Todos os modelos apresentaram valores de  $R^2$  próximos a unidade e baixos valores de DQM (Tabela 2).

Os modelos matemáticos de Page, Logarítimo e Midilli foram os que melhor representaram os dados experimentais para predizer a cinética de secagem do resíduo de acerola em FMO, em virtude de apresentarem os maiores  $R^2$  e menores DQM (Tabela 2), sendo o modelo de Midilli escolhido para representar o fenômeno de secagem dos resíduos, indicando uma representação satisfatória desse modelo para o processo de secagem.

Rosa (2010) analisou a secagem de cenoura em micro-ondas e a qualidade do produto final, em que dentre os modelos de Lewis e Page utilizados no estudo do processo, o modelo de Page foi o que melhor descreveu a cinética de secagem. Ribeiro (2013) avaliou a cinética de secagem de tomate em micro-ondas seguido de secagem convectiva, na qual se aplicou o modelo de Page para descrever o comportamento das curvas de secagem. Mata et al. (2014) analisaram a modelagem matemática do processo de secagem de feijão verde *in natura* e com desidratação osmótica, utilizando a tecnologia de micro-ondas, onde o modelo mais representativo para as secagens foi o de Page.

O fato de o modelo de Midilli ter sido o mais adequado diante dos demais modelos para representar a cinética de secagem em FMO de resíduo de acerola também pode ser verificado na Figura 2, na qual, está representada a curva de secagem, sendo a que mais se aproximou dos dados experimentais para os intervalos de tempo analisados.

Figura 1. Cinética de secagem do resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) em forno de micro-ondas, com ajuste pelo modelo de Midilli



De acordo com a Figura 1, a secagem do resíduo de acerola em FMO necessitou de 14 min para atingir o teor de água final de 24%, estando dentro do padrão de umidade estabelecido pela legislação brasileira, que preconiza que produtos de frutas secos ou desidratados apresentem valor de umidade inferior a 25% (ANVISA, 2005).

O tempo de secagem das amostras em FMO mostrou-se menor, indicando uma economia energética e maior eficiência do processo, quando comparado com o estudo realizado por Araújo et al. (2017), que estudaram a etapa de secagem da polpa de acerola em leito de espuma, nas temperaturas de 50, 55, 60, 65 e 70 °C, além de avaliar o efeito da temperatura sobre a cinética de secagem da polpa e ajustou modelos matemáticos para descrever o processo.

#### 4 CONCLUSÕES

O processo de desidratação de resíduo de acerola em FMO reduziu o tempo de secagem e o teor de água final apresentado pelo resíduo. O modelo de Midilli foi o que melhor se adequou aos dados experimentais, apresentando os maiores valores de  $R^2$  (0,999), e os menores valores para o

DQM (0,006). O estudo da cinética de secagem e o ajuste de modelos matemáticos podem ser aplicados para outros produtos e contribuir para a otimização dos processos de secagem em FMO.

#### **FOMENTO**

A CAPES pelo apoio financeiro a este trabalho, nas formas de auxílio à bolsa de Doutorado.



**REFERÊNCIAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005. Dispõe sobre o Regulamento Técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 set. 2005.

ALVES, J. A.; VALÉRIO, E.; VILAS, D. B.; MONTEIRO, B.; BOAS, V.; SOUZA, É. C. Qualidade de produto minimamente processado à base de abóbora, cenoura, chuchu e mandioquinha-salsa. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 3, p. 625-634, 2010.

ANDREOLA, K.; COSTA, R. G.; MARSAIOLI JÚNIOR, A.; TARANTO, O. P. Secagem de cubos de cenoura assistida por micro-ondas e análise da influência das condições operacionais no encolhimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 36., 2013, Maceió. **Anais...** Maceió, 2013.

ARAÚJO, I. M. C. **Caracterização bioativa de resíduos de frutas tropicais**. 2017. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C. SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. N. TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leito de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, e2016152, 2017.

BRAGA, A. C. D.; LIMA, M. S.; AZEVEDO, L. C.; RAMOS, M. E. C. Caracterização e obtenção de farinha do resíduo gerado no processo industrial de clarificação do suco de acerola. **Revista Semiárido de Visu**, v. 1, n. 2, p.126-133, 2011.

COSTA, J. D.; MACEDO, A. D. B.; SOUSA, A. P. M.; CAMPOS, A. R. N. Cinética de secagem em forno de micro-ondas da vagem de algaroba (*prosopis juliflora*). In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 1., 2016, Campina Grande. **Anais...** I Campina Grande, 2016.

FREITAS, C. A. S.; MAIA, G. A.; COSTA, J. M. C.; FIGUEIREDO, R. W.; SOUSA, P. H. M. Acerola: produção, composição, aspectos nutricionais e produtos. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 12, n. 4, p. 395-400, 2006.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Research Engineering**, v. 12, p. 732-736, 1962.  
INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos**. 4ª Ed., 1ª Ed. digital, São Paulo, 2008.

KADAM, D. M.; BALASUBRAMANIAN, S. Foam mat drying of tomato juice. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 35, n. 4, p. 488-495, 2011.

MATA, A. L. M. L.; COSTA, S. E. D.; CAPISTRANO, D. P. MORAES FILHO, F. C. Cinética da secagem do feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp) em micro-ondas com e sem pré-tratamento osmótico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2014.

MENDONÇA, A. P.; SAMPAIO, P. T. B.; ALMEIDA, F. A. C.; FERREIRA, R. F.; NOVAIS, J. M. Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.4, p.382–387, 2015.

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 3, p. 1644-1649, 2011.

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

MOURA, B. D. Estudo da dinâmica de secagem em um secador rotatório com alimentação intermitente. 2016. 100f. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

O'CALLAGHAN, J. R.; MENZIES, D. J.; BAILEY, P. H. Digital simulation of agricultural dryer performance. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 16, n. 3, p. 223-244. 1971.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers.** 1949. Dissertação de Mestrado, Purdue University, West Lafayette, 1949.

ROSA, J. G. Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em micro-ondas. 2010. 78f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

RIBEIRO, R. C. Tomates semi desidratados obtidos por secagem micro-ondas convectiva precedida por desidratação osmótica. 2013. 87f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2013.

SANTOS, A. E.; MARTINS, G. M. V.; CANUTO, M. F. C. S.; SEGUNDO, J. V.; ALMEIDA, R. D. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia ficus indica*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 01-06, 2016.

SEGTOWICK, E. C. S.; BRUNELLI, L. T.; VENTURINI FILHO, W. G. Avaliação físico-química e sensorial de fermentado de acerola. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 16, n. 2, p. 147-154, 2013.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; COSTA, L. M. The drying kinetics of forage turnips (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SOUSA, A. P. M.; MACEDO, A. D. B.; SILVA, A. P. F.; COSTA, J. D.; DANTAS, D. L.; SANTANA, R. A. C.; CAMPOS, A. R. N. Processamento de farináceo a partir da casca de jaca submetida à secagem em forno de micro-ondas. In: JORNADA DE ENSINO PESQUISA E EXTENSÃO DA UFRPE, 16., 2016, Recife. Anais... Recife, 2016.

TELÖKEN, F. T. **Análise da viabilidade tecnológica da desidratação de maçã em aparelho de micro-ondas doméstico.** 2016. 78f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.

YAGCIOGLU, A.; DEGIRMENCIOGLU, A.; CAGATY, F. Drying characteristics of laurel leaves under different condition. In: BAS CETINCELİK A, (ed.) **Proceedings of the seventh international congress on agricultural mechanization and energy**, Adana, 1999.