



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**MARCOS PAULO SANTOS LUZ**

**SECAGEM DE CAFÉS DESPOLPADOS EM PRESSÕES SUB-  
ATMOSFÉRICAS**

**LAVRAS – MG**

**2019**

**MARCOS PAULO SANTOS LUZ**

**SECAGEM DE CAFÉS DESPOLPADOS EM PRESSÕES SUB-ATMOSFÉICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa  
Orientador

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade  
Coorientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Luz, Marcos Paulo Santos.

Secagem de cafés despulpados em pressões sub-atmosféricas / Marcos Paulo Santos Luz. - 2019.

84 p. : il.

Orientador(a): Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Coorientador(a): Ednilton Tavares de Andrade, Flávio Meira Borém.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Cafés especiais. 2. Secagem a vácuo. 3. Cinética de secagem. I. Corrêa, Jefferson Luiz Gomes. II. Andrade, Ednilton Tavares de. III. Borém, Flávio Meira. IV. Título.

**MARCOS PAULO SANTOS LUZ**

**SECAGEM DE CAFÉS DESPOLPADOS EM PRESSÕES SUB-ATMOSFÉICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 16 de Agosto de 2019

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade	UFLA
Prof. Dr. Irineu Petri Junior	UFLA
Prof. Dra. Letícia Fernandes de Oliveira	UFSJ
Dra. Cláudia Mendes dos Santos	UFLA

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa  
Orientador

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade  
Coorientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2019**

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, gostaria de agradecer a Deus, pela FORÇA, inteligência e sabedoria que me proporcionou para que eu chegasse até aqui. Sobretudo no ano de 2018, que foram os momentos mais difíceis de toda minha vida.

À minha família, especialmente a minha mãe, Leila Maria dos Santos Luz, e meu pai, José Artenio Luz, pelo apoio aos estudos, trabalho duro, lutando por minha educação, pela força, incentivo, conselhos, carinho, confiança, incentivo e por nunca ter me deixado desistir. Aos meus irmãos, Mário e Matheus, pelo respeito, amizade, torcida e apoio.

À minha namorada, Roberta, pelo respeito, carinho, compreensão, amizade e principalmente por todo amor, além disso, por ser meu porto seguro e por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis que vivi em 2018. Obrigado por toda dedicação em me fazer feliz e por estar sempre ao meu lado!

Aos meus tios e tias, primos e primas, pelo incentivo, amizade, carinho, companheirismo e festas.

Às minhas avós, pelas orações e pensamentos positivos.

A todos os amigos de Lavras.

Aos amigos, Murilo e Danilo, e suas respectivas namoradas, Stella e Luciana, pela amizade, força, incentivo e principalmente pelos momentos de descontração.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola da UFLA, pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa, pela oportunidade, orientação, incentivo, amizade, dedicação e ensinamentos, que foram de grande relevância para a realização deste trabalho e o meu desenvolvimento profissional.

Ao professor Dr. Ednilton Tavares de Andrade que com seu conhecimento e apoio, coorientou o trabalho, incentivando e permitindo que fosse realizado.

Ao professor Dr. Flávio M. Borém, pelos ensinamentos e oportunidade de trabalhar com a cultura do café, principalmente a pós-colheita, exemplo de profissionalismo e estímulo à pesquisa científica.

Ao Dr. Irineu Petri Junior, à Dra. Letícia Fernandes de Oliveira, pela participação na banca examinadora.

Aos integrantes, ex-integrantes e parceiros do Laboratório de Processamento de Produtos Agrícola da UFLA, pela contribuição, convivência, aprendizado e amizade conquistada ao longo dos últimos anos.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO GERAL

A secagem é um processo de grande importância na qualidade final da bebida do café. Apesar de ser uma operação de rotina, condições como a exposição do produto a altas temperaturas podem causar danos na sua qualidade. Além disso, é a etapa de maior exigência de energia, consequentemente, um processo com altos custos. Dentre os tipos de secagem de produtos agrícolas, a secagem a vácuo permite a evaporação de água em baixas temperaturas com o aumento da taxa de redução de água e redução do tempo de secagem. Ademais, os meios deteriorativos diminuem em razão da baixa concentração de oxigênio na atmosfera do processo de secagem. Dessa maneira, objetivou-se avaliar a cinética e os efeitos fisiológicos causados pela secagem à vácuo de cafés despulpados, bem como propor um modelo de secagem para o processo à vácuo. O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Os frutos de café (*Coffea arabica* L. cv. Topázio MG 1190) foram colhidos no campo experimental da UFLA de forma manual e seletiva. Esses foram descascados mecanicamente e posteriormente despulpados. Após esse processo, o café em pergaminho foi secado em estufa a vácuo sob pressões absolutas de 747 (pressão atmosférica), 447, 347, 247 e 147 mmHg e temperatura do ar de secagem de  $35\pm 1$  e  $40\pm 1$ °C. Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo foi uma função dos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para analisar os efeitos fisiológicos, os cafés foram avaliados através de microscopia eletrônica de varredura. O modelo de Midilli foi um dos que melhores que se ajustou para o café despulpado para as duas temperaturas em estudo na condição de pressão local (atmosférica). Após a seleção do melhor modelo, esse foi modificado para se adequar as condições de secagem a vácuo proposto. Foi utilizado uma equação de Arrhenius para sua modificação. Os resultados mostrados confirmam o ajuste satisfatório desse modelo para descrever a cinética de secagem a vácuo. Por meio das eletromicrografias foi possível observar a diferença da parede celular dos grãos de acordo com a redução do vácuo. Para a pressão absoluta de 347 mmHg, notou-se poucos danos nas membranas celulares, proporcionando assim, uma condição adequada para a secagem de cafés despulpados, reduzindo em até 19% no tempo de secagem em relação à pressão local (atmosférica). Observou-se uma redução de aproximadamente 50% no tempo de secagem para a menor pressão absoluta utilizada, entretanto, foi onde se observou os maiores danos celulares.

**Palavras-chave:** Secagem a vácuo, *Coffea arabica* L., pressões absolutas, modelos matemáticos, microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## GENERAL ABSTRACT

Drying is a process of great importance in the final quality of the coffee beverage. Despite being a routine operation, conditions such as exposure of the product to high temperatures can damage its quality. Moreover, it is the stage of highest energy demand, therefore a process with high costs. Among the types of drying of agricultural products, vacuum drying allows evaporation of water at low temperatures with increasing water reduction rate and drying time reduction. Moreover, the deteriorating media decrease due to the low oxygen concentration in the atmosphere of the drying process. Thus, the objective was to evaluate the kinetics and physiological effects caused by vacuum drying of pulped coffee, as well as to propose a drying model for the vacuum process. The present work was carried out at the Agricultural Product Processing Laboratory of the Engineering Department of the Federal University of Lavras. The coffee fruits (*Coffea arabica* L. cv. Topázio MG 1190) were harvested in the UFLA experimental field manually and selectively. These were mechanically peeled and subsequently pulped. After this process, the parchment coffee was dried in a vacuum oven under absolute pressures of 747 (atmospheric pressure), 447, 347, 247 and 147 mmHg and drying air temperature of  $35 \pm 1$  and  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ . For the adjustment of the mathematical models, nonlinear regression analyzes were performed by the Gauss-Newton method, using the STATISTICA 5.0® software (Statsoft, Tulsa, USA). The choice of the best model was a function of the statistical parameters: estimate standard deviation (SE), relative mean error (P) and coefficient of determination ( $R^2$ ). To analyze the physiological effects, the coffees were evaluated by scanning electron microscopy. The Midilli model was one of the best fit for the pulped coffee for the two temperatures under study at the local (atmospheric) pressure condition. After selecting the best model, it was modified to suit the proposed vacuum drying conditions. An Arrhenius equation was used for its modification. The results shown confirm the satisfactory fit of this model to describe the vacuum drying kinetics. Through the micrographs it was possible to observe the difference of the grain cell wall according to the vacuum reduction. For the absolute pressure of 347 mmHg, little damage to the cell membranes was noted, thus providing a suitable condition for the drying of pulped coffee, reducing up to 19% in the drying time in relation to the local (atmospheric) pressure. It was observed a reduction of approximately 50% in the drying time to the lowest absolute pressure used, however, this was where the greatest cell damage was observed.

Keywords: Vacuum drying. *Coffea arabica* L. Absolute pressures. Mathematical models. Scanning Electron Microscopy (SEM).

## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

#### ARTIGO 1

- Figura 1 - Estufa à vácuo do modelo SL-104/40.....41
- Figura 2 - Valores de razão de umidade observados durante a secagem do café despulpado, em função do tempo. ....45
- Figura 3 - Valores de umidade relativa do ar de secagem, para as pressões absolutas estudadas e temperatura de 35°C, observados durante a secagem do café despulpado, em função do tempo. ....46
- Figura 4 - Valores de umidade relativa do ar de secagem, para as pressões absolutas estudadas e temperatura de 40°C, observados durante a secagem do café despulpado, em função do tempo. ....46
- Figura 5 - Taxa de redução de água em função do tempo de secagem dos grãos de café despulpados para a temperatura de 35°C. ....50
- Figura 6 - Taxa de redução de água em função do tempo de secagem dos grãos de café despulpados para a temperatura de 40°C. ....50
- Figura 7 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 35°C e pressão absoluta de 147 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular...52
- Figura 8 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 40°C e pressão absoluta de 147 mmHg. Setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular. ....52
- Figura 9 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 35°C e pressão absoluta de 747 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular...53
- Figura 10 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 40°C e pressão absoluta de 747 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular. 53
- Figura 11 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 35°C e pressão absoluta de 347 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular. 55
- Figura 12 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 40°C e pressão absoluta de 347 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular. 56

## ARTIGO 2

Figura 1 - Estufa à vácuo do modelo SL-104/40.....	65
Figura 2 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café despulpado nas duas temperaturas estudadas e pressão local (atmosférica), em função do tempo. ....	72
Figura 3 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem do café despulpado na temperatura de 35°C e nas diferentes pressões estudadas, em função do tempo.....	77
Figura 4 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem do café despulpado na temperatura de 40°C e nas diferentes pressões estudadas, em função do tempo.....	77

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

#### ARTIGO 1

- Tabela 1 - Valores médios do teor de água, umidade relativa média do ar de secagem, taxa de redução de água e tempo de secagem dos cafés despolpados em função das pressões absolutas.....47
- Tabela 2 - Valores médios de tempo de secagem (horas), até o café atingir  $0,125 \pm 0,005$  kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (bs) no grão, para o café despolpado, em função da pressão absoluta e da temperatura do ar de secagem.....51

#### ARTIGO 2

- Tabela 1 - Modelos matemáticos usados para predizer o fenômeno de secagem. ....67
- Tabela 2 - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), para os modelos analisados, na secagem do café despolpado, nas temperaturas de 35 e 40°C e pressão local.....70
- Tabela 3 - Coeficientes do modelo de Midilli escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café despolpado, para as duas temperaturas estudadas.. ....73
- Tabela 4 - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), para os modelos analisados, na secagem do café despolpado, nas temperaturas de 35 e 40°C e diferentes pressões. ....75
- Tabela 5 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café despolpado, para as duas temperaturas estudadas. ....76
- Tabela 6 - Valores de raio equivalente ( $R_{eq}$ ) e coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ) dos grãos de café despolpados, em função das combinações temperatura do ar de secagem e pressão absoluta.....76

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	14
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>2.1 Importância do café no Brasil</b> .....	16
<b>2.2 Colheita e pré-processamento do café</b> .....	16
<b>2.3 Secagem do café</b> .....	18
<b>2.4 Teoria da secagem</b> .....	19
<b>2.5 Taxa de redução de água</b> .....	20
<b>2.6 Secagem a vácuo</b> .....	22
<b>2.7 Modelagem matemática e simulação da secagem do café</b> .....	24
<b>2.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....	26
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	28
<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> .....	35
<b>ARTIGO 1 – ALTERAÇÕES ULTRAESTRUTURAIS DE GRÃOS DE CAFÉ DESPOLPADO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES PRESSÕES ABSOLUTAS NA SECAGEM A VÁCUO</b> .....	35
<b>RESUMO</b> .....	36
<b>ABSTRACT</b> .....	36
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	38
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	40
<b>2.1 Procedimento experimental</b> .....	40
<b>2.2 Sistema de secagem</b> .....	40
<b>2.3 Teor de água</b> .....	41
<b>2.4 Taxa de redução de água</b> .....	42
<b>2.5 Razão de umidade</b> .....	42
<b>2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....	43
<b>2.7 Delineamento experimental</b> .....	44
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	45
<b>3.1 Caracterização da secagem</b> .....	45
<b>3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....	51
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	57
<b>5 AGRADECIMENTOS</b> .....	57

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58
<b>ARTIGO 2 – MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM A VÁCUO DE CAFÉS DESPOLPADOS</b> .....	60
<b>RESUMO</b> .....	61
<b>ABSTRACT</b> .....	61
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	62
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	64
<b>2.1 Procedimento experimental</b> .....	64
<b>2.2 Sistema de secagem</b> .....	64
<b>2.3 Teor de água</b> .....	65
<b>2.4 Cinética de secagem e ajuste dos modelos</b> .....	66
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	70
<b>3.1 Ajuste dos modelos matemáticos</b> .....	70
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	80
<b>5 AGRADECIMENTOS</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81
<b>APÊNDICES</b> .....	85

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura brasileira configura como uma importante receita para a economia, correspondendo ao segundo produto mais valioso das exportações agrícolas nacionais. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com estimativa de produção, para a safra 2019, de aproximadamente 51 milhões de sacas de 60kg do produto beneficiado (CONAB, 2019).

Como um grande exportador de café, o Brasil tem uma imagem internacional de produtor de grandes volumes, mas de baixa qualidade sensorial. Incentivado pelas mudanças e pelos requisitos do mercado o Brasil vem tentando mudar sua imagem na última década. Os consumidores estão preferindo cada dia mais por consumir os cafés partindo dos melhores atributos sensoriais. Este fato pode ser comprovado pelo expressivo crescimento da demanda por cafés especiais, que segundo estimativas da BSCA (BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION – BSCA, 2018), este mercado cresceu 19% em 2018. Ademais, os cafés especiais podem ter preços muito superiores ao café *commodity* (GIOMO; BORÉM, 2011; RIBEIRO et al., 2011).

Todavia, a qualidade sensorial da bebida do café é influenciada por fatores genéticos, ambientais e tecnológicos (FIGUEIREDO et al., 2013, 2015; ISQUIERDO et al., 2013; RIBEIRO et al., 2011; SELMAR et al., 2008; SILVEIRA, 2014; TAVEIRA et al., 2012; TOLEDO et al., 2016). Entre os fatores tecnológicos, as etapas de processamento e secagem se distinguem, sendo realizados vários trabalhos com o objetivo de explicar de que forma essas etapas influenciam a qualidade dos cafés.

A secagem é um fator de grande importância na qualidade final da bebida do café. Mesmo sendo uma operação rotineira, fatores como a exposição do produto a altas temperaturas podem levar a danos na qualidade. Além disto, é a etapa de maior exigência de energia, como resultado, um processo com altos custos financeiros.

A secagem do café é historicamente realizada em terreiros, usando energia solar e movimento natural do ar para remoção da água ou em secadores mecânicos que usam ar forçado aquecido a diferentes temperaturas. Todavia, objetivando um maior rendimento, geralmente emprega-se a combinação desses dois métodos, aplica-se um período de pré-secagem em

terreiro, quando o café ainda possui alto teor de água, e a complementação da secagem em secadores mecânicos, com temperaturas elevadas (BORÉM, 2013).

No Brasil, a grande dificuldade da cafeicultura é a etapa da secagem, que necessita de novas tecnologias ou metodologias para secagem de cafés, uma vez que, o país já possui elevada tecnologia que possibilita altas produtividades durante a colheita.

Os frutos de café recém colhidos distinguem-se de outros produtos agrícolas, que são cultivados em larga escala, por apresentarem certas especificidades, como o alto teor de água, aproximadamente 60% (b.u.), e a desuniformidade de maturação em uma massa de frutos. Portanto, a secagem torna-se uma etapa primordial, evitando fermentações e prováveis ataques de micro-organismos que influenciam na qualidade final do produto (RESENDE et al., 2009; BORÉM, 2013).

Pesquisas estão sendo realizadas em busca de novos métodos ou tecnologias de secagem, visando, a redução do tempo e os gastos resultantes dessa etapa, sem modificar a qualidade final da bebida. A elevação da taxa de redução de água pode ser obtida com a alteração de algumas variáveis, como a temperatura, o fluxo de ar ou na redução da umidade do ar de secagem.

A redução da pressão favorece a secagem por possibilitar a retirada da umidade do alimento em temperaturas mais baixas que a usualmente utilizadas. O uso de vácuo conduz, adicionalmente à redução da concentração de oxigênio com consequente diminuição de reações oxidativas. Com isso, essa tecnologia seria indicada para a secagem de café.

Estudos sobre a secagem de cafés submetidos a pressões sub-atmosféricas e seus impactos na qualidade, com dados de análises fisiológicas e na cinética de secagem como indicadores de qualidade, estão cada vez mais sendo desenvolvidos. O objetivo desses estudos é a busca de um sistema de secagem com alta taxa de redução de água e baixas temperaturas, que não provoquem danos a estrutura celular dos grãos de café.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Importância do café no Brasil**

Em 1727, a cultura do café foi implantada no Brasil e desde o início teve grande importância para a economia do país. Essa cultura se adequou excelentemente as condições ambientais brasileira, resultando em uma das principais receitas de produtores da região Sudeste.

No momento atual, o Brasil é o líder em produção e exportação de café. A estimativa, para a produção da safra cafeeira (espécies arábica e conilon) em 2019 é de aproximadamente 51 milhões de sacas de café beneficiado. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2019).

Ainda que a cafeicultura brasileira seja líder mundial, em exportação e produção, o setor produtivo requer cuidados nas mudanças de consumo. A qualidade do produto é um aspecto essencial na obtenção de novos mercados. Os cafés brasileiros ainda são considerados como comuns, de qualidade inferior e pouca distinção, obtendo um valor mais baixo no mercado exterior.

A demanda dos consumidores por cafés de qualidade superior faz com que o comércio de cafés especiais tenha um crescimento em maior proporção quando comparado aos cafés comuns (BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION - BSCA, 2018).

### **2.2 Colheita e pré-processamento do café**

A colheita do café pode ser mecanizada, semimecanizada ou manual, sendo, geralmente, realizada de duas formas: derriça completa ou colheita seletiva. Na derriça completa, método predominante no Brasil, os frutos são derriçados (colhidos) do cafeeiro sobre pano colocado no chão ou diretamente no chão, obtendo-se um produto bastante heterogêneo, constituído de frutos maduros (cereja), imaturos (verdes) e sobremaduros (passa e seco), além de outros materiais e impurezas, como folhas, ramos, paus, terra, pedras, etc. Já na colheita seletiva, são colhidos apenas os frutos maduros (BORÉM, 2013). Dessa forma, colheitas tardias podem conter uma maior quantidade de frutos secos e suscetíveis de fermentações indesejáveis. Por outro lado, uma colheita adiantada, com muitos frutos verdes, poderá resultar em defeitos verdes e pretos-verdes.

O café, após ser colhido, deve seguir imediatamente para o processamento, não podendo ser armazenado, ainda úmido, por períodos superiores a 8 horas, em razão de riscos de ocorrerem fermentações indesejáveis e a formação do defeito ardido (BRANDO, 2004).

Após a colheita, o café poderá passar pelo processo de abanação e peneiramento, manual ou mecânico, que tem a finalidade de retirar as impurezas menos densas (folhas, gravetos e outras impurezas), maiores e menores que os frutos. Em seguida, independentemente do método de processamento adotado, é recomendado que o café seja submetido à separação hidráulica em lavadores, na qual os frutos mais densos (maduros e verdes) são separados da porção menos densa (sobremaduros, brocados, chochos, etc). São os cafés bóia os responsáveis pela composição de alguns defeitos (GUIMARÃES, 1995; ORNELLAS, 2001).

No processamento do café, são utilizados, principalmente, dois métodos, a via seca e a via úmida. Nos dois métodos, o objetivo é secar o café até o ponto seguro para o correto armazenamento e beneficiamento (FIGUEIREDO, 2010), suprimindo os riscos com oxidação e fermentações indesejáveis (SAATH et al., 2012).

O processamento por via seca consiste em secar os frutos na sua forma integral, ou seja, com exocarpo (casca), mesocarpo (polpa e mucilagem) e endocarpo (pergaminho), originando o que é conhecido como café em coco ou natural. O processamento por via úmida, que origina os cafés em pergaminho, pode ser realizado de diferentes formas: removendo-se a casca e parte da mucilagem mecanicamente, dando origem ao café descascado; removendo-se a casca mecanicamente e a mucilagem por fermentação biológica, originando o café despulpado ou removendo-se a casca e a mucilagem mecanicamente, dando origem ao café desmucilado (MALTA, 2011; BORÉM et al., 2014; CLEMENTE et al., 2015).

A etapa de processamento do café tem por finalidade promover a separação dos frutos em lotes mais homogêneos. Tal separação pode ser feita pelo estágio de maturação, teor de água, tamanho e densidade, dentre outros, o que facilita as operações posteriores, principalmente a secagem (ALVES et al., 2013). O que torna importante essa etapa, visto que, a separação dos frutos imaturos (verdes) dos frutos maduros (cerejas) é essencial para o alcance de uma bebida de melhor qualidade (WINTGENS, 2004).

Cafés processados por via úmida mostram ter uma melhor qualidade fisiológica comparado aos processados via seca (TAVEIRA et al., 2012; ALVES, 2013; MALTA et al., 2013;). Uma das causas para essa qualidade fisiológica inferior dos cafés naturais, é o maior tempo de exposição ao ar de secagem que são sujeitos, bem como o uso de temperaturas de secagem mais elevadas, por consequência do maior número de obstáculos físicos. Essa conjuntura expõe o endosperma e o embrião a avarias térmicas mais severas, contribuindo com

uma maior perda da integridade das membranas celulares (SAATH et al., 2012; TAVEIRA et al., 2012; ALVES, 2013).

A escolha do tipo de processamento do café é variável entre os produtores e dependerá de fatores como: aspectos climáticos, tecnológicos, econômicos e as exigências do mercado consumidor quanto às características do produto (ISQUIERDO et al., 2012). É bem conhecido que o modo de processamento do café, seja pelo método via úmida ou via seca, influencia fortemente e distingue a qualidade dos cafés, estabelecendo perfis sensoriais distintos.

### **2.3 Secagem do café**

Os frutos de café, comumente, são colhidos com teores de água variando entre 30% e 65% (b.u), conforme o seu estágio de maturação, ficando sujeito à rápida deterioração. Desse modo, antes de ser armazenado, o café deverá ser seco.

De todas as etapas da pós-colheita do café, a secagem é a etapa de maior importância, tanto na perspectiva do consumo de energia e geração de custos de processamento, como na perspectiva da manutenção da qualidade do produto (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014; DONG et al., 2017).

A secagem é a técnica mais utilizada na preservação do produto e é realizada em terreiros, ou em secadores mecânicos ou numa combinação de ambos (SILVA & BERBERT, 1999). No Brasil, a secagem do café em terreiros é a prática mais usada, se não de forma total, pelo menos na fase inicial de secagem, quando ela é combinada com a secagem mecânica.

Durante a secagem, a redução do teor de água ocorre devido à sua movimentação, do interior para a periferia do produto, resultado da diferença de pressão de vapor de água, entre a superfície do produto e o ar que o envolve. Para que um produto seja submetido à secagem, é necessário que a pressão parcial de vapor de água em sua superfície seja maior do que a pressão parcial do vapor de água no ar de secagem (BORÉM, 2008).

Inicialmente, o processo de secagem pode ser feito com o aporte de grande quantidade de energia, já que a grande quantidade de água contida no fruto e que se encontra no estado livre vai absorver toda a energia aplicada para se evaporar, não aquecendo muito e sem risco para a massa do café (ALVES et al., 2017).

A manutenção da qualidade do café pela secagem consiste na razão pela qual, a redução da quantidade de água disponível, a atividade de água será diminuída e, em consequência, a velocidade das reações químicas, bioquímicas e do desenvolvimento de micro-organismos,

contribuindo para um armazenamento seguro por períodos maiores (CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1974; DOYMAZ, 2008).

Alves et al. (2017) compararam variáveis fisiológicas (condutividade elétrica, lixiviação de potássio e porcentagem de germinação), com variáveis de cinética de secagem (tempo e taxa de secagem) e com análise sensorial. Apuraram também, a maior sensibilidade de cafés naturais à secagem mecânica, apresentando os piores desempenhos fisiológicos. No mesmo estudo, o fluxo de ar não prejudicou a qualidade fisiológica; a elevação da temperatura de 40°C para 45°C, em cafés despulpados, mostrou queda na qualidade fisiológica. O aumento da taxa de secagem, através da elevação do fluxo de ar de secagem para temperatura de 40°C, apresentou efeito negativo na qualidade sensorial do café despulpado.

## **2.4 Teoria da secagem**

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que representa a remoção do excesso de água, contida no grão por meio de evaporação, comumente, causada por convecção forçada de ar aquecido (BROOKER et al., 1992).

Durante a secagem, a redução do teor de água ocorre por uma diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. Para que ocorra a secagem, é necessário que a pressão parcial de vapor d'água em sua superfície seja maior do que no ar de secagem (ATHIÉ, 1998; PABIS et al., 1998; BORÉM et al., 2014).

Numerosos mecanismos térmicos e físicos têm sido propostos para descrever o transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos. Contudo, o fenômeno de migração de água do interior de grãos ainda não é bem conhecido. (BROOKER et al., 1992). Essa migração ora ocorre por difusão de vapor d'água, ora por difusão líquida de água conforme trabalhos mais recentes.

Visando um produto de melhor qualidade ao final do processo, é de grande importância o estudo da cinética de secagem dos produtos agrícolas. Para tal, seleciona-se a temperatura adequada e o tempo necessário (AVHAD; MARCHETTI, 2016).

Para determinados produtos agrícolas, o processo de secagem, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, pode ser dividido em um período de taxa de secagem transiente, taxa de secagem constante e outro de taxa de secagem decrescente (BORÉM, 2013).

No início do processo, o produto é comumente mais frio que o ar de secagem e a pressão parcial do vapor d'água à superfície do produto é menor, logo, a transferência de massa e por consequência a velocidade de secagem são muito menores. Esse fenômeno, taxa transiente, prolonga-se enquanto a transferência de calor compensa exatamente a transferência de massa. Após um pequeno tempo o processo toma um caráter linear. Esse estado linear, período de taxa constante, ocorre nas primeiras horas de secagem, quando o produto agrícola se encontra com teor de água elevado. Nesse período, a temperatura mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam, ou seja, a energia perdida na forma de calor sensível é recuperada na forma de calor latente de vaporização. O mecanismo interno de fluxo de água não afeta a velocidade de secagem, porque a taxa interna de deslocamento de água para a superfície do produto é igual ou maior do que a máxima taxa de remoção de vapor d'água pelo ar, sendo evaporada apenas a água retida por capilaridade (BORÉM, 2013).

No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa interna de transporte de água é menor do que a evaporação superficial. Dessa forma, a transferência de calor do ar para o produto não é compensada e, como resultado, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem. Nessa fase, ocorrem os maiores riscos de perda de qualidade por danos térmicos (BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992; BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014).

Os grãos de produtos agrícolas, comumente, denotam o período de secagem com taxa constante muito reduzido, ou nenhum, uma vez que, nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água se encontram essencialmente no seu interior, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície. Isto é, deve-se essencialmente às diferentes velocidades da migração das moléculas de água do interior para a periferia do produto e a de evaporação das moléculas de água da superfície (LASSERAN, 1978; CORRÊA et al., 2010b).

## **2.5 Taxa de redução de água**

Taxa de redução de água é a relação entre a quantidade de água que é perdida pelo produto em certo período de tempo. Essa pode ser influenciada por fatores como: umidade relativa e velocidade do ar de secagem, temperatura, umidade inicial do produto e tempo de exposição do produto à temperatura de secagem, método de secagem, entre outros. A falta do

controle desses fatores pode comprometer a qualidade do produto final (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014).

O principal fator de influência na taxa de redução de água é a temperatura do ar de secagem. Temperaturas mais altas tornam a secagem mais rápida, portanto, mais econômica (BURMESTER; EGGERS, 2010). Herman-Lara et al. (2010) demonstram um aumento na taxa de redução de água, motivado pela elevação da temperatura e do fluxo de ar de secagem em pacotes de cenouras.

Na secagem contínua, os grãos ou frutos são expostos ao ar aquecido do início ao fim da operação. Nesse caso, conforme o teor de água dos grãos é reduzido, ocorre um aumento no gradiente de umidade entre o interior e a superfície dos grãos. Como consequência, a taxa de redução de água diminui e a temperatura dos grãos tende a se igualar à temperatura do ar de secagem, nessa fase, cresce a possibilidade da ocorrência de danos térmicos (VILLELA; PESKE, 2003).

Na avaliação da influência da temperatura sobre o tempo de secagem em frutos da palma, Santos et al. (2016) verificaram que, para a variação de temperatura de 50°C para 70°C, o tempo de secagem foi reduzido de 720 minutos para 540 minutos. Já para a redução do tempo de secagem para o feijão-caupi de 10,4 horas para 2,1 horas para as temperaturas de 30 e 50°C, respectivamente (Camicia et al., 2015).

Estudando o efeito de quatro níveis de temperatura (45, 55, 65 e 75°C) e três níveis de velocidade do ar (0,25; 0,75 e 1,25 m.s<sup>-1</sup>), na secagem convectiva de fatias de alho em camadas, Abdelmotaleb (2009) constatou aumento na taxa de redução de água com a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem. Contudo, o consumo específico de energia reduziu com a elevação da temperatura e aumentou para maiores fluxos de ar. Modificando-se a temperatura de 45 a 75°C, para a velocidade de 0,25 m.s<sup>-1</sup> do ar, o tempo de secagem diminuiu de 840 para 300 minutos e o consumo específico de energia reduziu de 41,37 para 17,78 MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada. Já na velocidade de 1,25 m.s<sup>-1</sup>, o tempo de secagem diminuiu de 600 para 165 minutos e o consumo específico de energia caiu de 73,8 para 50,91 MJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada.

Avaliando o efeito da taxa de redução de água na qualidade do café natural, utilizando ar de secagem com diferentes umidades relativas, Isquierdo et al. (2013) concluíram que mesmo para baixas temperaturas, 35 e 40 °C e com a elevação da taxa de redução de água provocada pela redução da umidade relativa do ar de secagem, tem efeito negativo na qualidade sensorial do café natural.

Em uma avaliação da cinética de secagem de café cereja descascado, independentemente da temperatura do ar de secagem (40, 45 e 50°C), mostrou que o aumento do fluxo de ar de 20 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> para 30 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup> tem efeito significativo na taxa de redução de água apenas na primeira hora de secagem e que o fluxo de ar não teve influência na qualidade sensorial da bebida (Ribeiro et al., 2003).

Diversas pesquisas tem demonstrado que, quando se visa à produção de cafés de qualidade superior, a temperatura da massa de café não pode exceder 40 °C (BORÉM et al., 2006; BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; OLIVEIRA, 2010; SAATH et al., 2010; ISQUIERDO et al., 2013).

## 2.6 Secagem a vácuo

O método de secagem mais utilizado é a secagem convectiva, pois se trata de um método de fácil implementação e com nível tecnológico mais acessível (JANGAM, 2011). Porém, a secagem a vácuo é uma alternativa à secagem convencional, já que em alguns casos, a exposição prolongada em uma secagem convectiva costuma provocar danos térmicos aos grãos. Métodos de secagem menos agressivos, como a secagem a vácuo apresentam menores alterações químicas e bioquímicas nos alimentos quando comparados aos métodos de secagem com ar quente (AGHBASHLO et al., 2013; ORIKASA et al., 2014).

Por efeito do vácuo, a evaporação da água acontece em temperaturas mais amenas, fazendo com que o processo se torne mais eficaz. Assim sendo, os produtos de elevada qualidade, conservam as suas características iniciais utilizando este tipo de processamento (PUHL; NITZKE, 2014). De acordo com Sokhansanj e Jayas (2006), o processo de secagem a vácuo baseia-se em secar o produto, empregando a união de fatores, aquecimento e vácuo. A troca de calor acontece por condução e radiação, ou seja, o calor é transportado da placa de aquecimento para a bandeja, contendo o alimento por condução, do qual, o alimento também é submetido à transferência de calor por radiação, proveniente das paredes da câmara. Compreender essa diferenciação é fundamental para assimilar as vantagens e restrições da secagem à vácuo, igualmente para escolher um secador à vácuo que, de forma eficiente e econômica, atinge aos objetivos do processo (PUHL; NITZKE, 2014).

Na secagem a vácuo, o ponto de ebulição da água é diminuído para menos de 100°C com a redução da pressão do processo. A diminuição da pressão do processo e a temperatura de secagem a serem empregadas consistem da sensibilidade do material. Este método de secagem pode ser considerado um procedimento intermediário entre a secagem convencional e

a liofilização, visto que possibilita trabalhar em baixas pressões (menores que 100 mmHg) e em temperaturas amenas, obtendo-se maiores taxas de evaporação de água e um produto final de melhor qualidade se comparado com a secagem convencional com ar quente (KOMPANY et al., 1990; DEBS-LOUKA et al., 1996; KROKIDA; MAROULIS, 1997; PORCIUNCULA, 2014). O vácuo causa a expansão do ar e do vapor de água presentes no alimento, dando origem a uma estrutura porosa e inflada. Essa estrutura expandida resulta em uma alta razão área/volume, que resulta em altas taxas de redução de água (JAYA; DAS, 2003).

A sensibilidade térmica dos materiais estabelece a máxima temperatura conforme a secagem precisa ser levada no decorrer do tempo. Essa temperatura muda inversamente com o tempo de retenção. Deste modo, quando o tempo de secagem é extenso, o processo sob vácuo pode ser utilizado para amenizar as temperaturas de evaporação até níveis seguros (KEEY, 1972), visto que na secagem a vácuo a água evapora a baixa temperatura, além de diminuir o tempo de secagem. Uma adicional vantagem da utilização da secagem a vácuo é a célere capacidade de secagem, afora um baixo consumo de energia.

A secagem a vácuo é um processo em que o material úmido é seco sob pressão sub-atmosférica (ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005) e uma de suas características peculiares em comparação com a temperatura atmosférica convencional é que, a oxidação do produto é evitada, pois, o produto não tem contato com o ar durante o processo de secagem. Portanto, os atributos sensoriais e nutritivos dos alimentos são efetivamente mantidos, devido ao tempo comparativamente curto e a baixa temperatura de secagem (WU et al., 2007).

Um processo complexo que pode alterar uma variedade de características químicas, bioquímicas e mecânicas do produto a ser seco é a secagem de produtos sensíveis ao calor de origem biológica. Por exemplo, desidratação térmica de biomateriais pode afetar um ou mais das suas propriedades mecânicas (fragilidade, friabilidade, dureza, elasticidade), físicas (perda de aroma, encolhimento, reidratação solubilidade), químicas (degradação de vitaminas, diminuição de valor nutritivo), enzimáticas (habilidade catalítica, estabilidade) e bioquímicas (atrofia das células, viabilidade) (PAN et al., 1999).

Os secadores a vácuo têm que ser utilizados na redução da temperatura de secagem, para materiais sensíveis à injúria pelo calor excessivo, quando a secagem é conduzida a altas temperaturas e a pressão atmosférica, deve-se utilizar a secagem a vácuo a baixas pressões, evitando a degradação dos produtos sensíveis à oxidação ou de seus componentes. Conseqüentemente, a utilização de vácuo a baixas pressões de trabalho durante a secagem, associada a temperaturas um pouco mais altas que a ambiente, uma vez que ocorre a diminuição

na concentração de oxigênio durante o processo, esta pode ser usada como forma de prevenção do escurecimento de certos produtos (SWASDISEVI et al., 2007).

Kutovoy et al. (2005), trabalhando com secagem a vácuo de produtos processados derivados de uvas utilizando temperaturas abaixo de 50°C, mais de 95% dos ingredientes nutricionais, vitaminas e outros componentes biológicos ativos, foram preservados. Em experimento de secagem a vácuo de kiwi, Orikasa et al. (2014) consideraram que o método foi o mais adequado na manutenção da composição química do produto, como por exemplo, do ácido ascórbico.

Zhang et al. (2018), estudaram o efeito de diferentes métodos de secagem, entre eles, a secagem por vácuo de micro-ondas, avaliando a composição nutricional, sabor e propriedades funcionais de castanhas chinesas. Os resultados mostraram que a secagem à vácuo por micro-ondas em relação a qualidade ficou em segundo lugar, entretanto o mesmo método exibiu uma taxa de secagem mais rápida e com menor consumo de energia.

A secagem a vácuo é mais comumente utilizada para a secagem de alimentos como rabanete (LEE; KIM, 2009), cenoura e abóbora (ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005), berinjela (REIS; MASSON; WASZCZYNSKYJ, 2006), manjeriço (FERREIRA; SILVEIRA JUNIOR, 1999), entre outros alimentos, sendo pouco utilizada para a secagem de grãos.

Rocha (2018) através da secagem à vácuo em cafés descascados, avaliou e determinou a cinética de secagem e os efeitos fisiológicos causados pela secagem. Pressões reduzidas levaram a menores tempos de secagem comparados à secagem a pressão atmosférica e a qualidade fisiológica dos grãos não foi afetada para pressões inferiores a pressão atmosférica.

## **2.7 Modelagem matemática e simulação da secagem do café**

A simulação matemática do método de secagem é fundamental para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos. O uso de modelos matemáticos, no decorrer da secagem, contribui para a execução dos projetos e dimensionamento dos equipamentos, bem como a compreensão dos processos relacionados (CORRÊA et al., 2010a; ALVES et al., 2013; ISQUIERDO et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013).

Os modelos matemáticos são usados com o objetivo de estimar o tempo de secagem dos produtos e, do mesmo modo, para obter as curvas de secagem que representam a operação (Midilli, Kucuk e Yapar, 2002).

Com a finalidade de caracterizar a taxa de redução de água durante a secagem em camada fina de materiais biológicos, muitos modelos têm sido propostos (ERBAY; ICIER, 2010), dentre os quais podemos citar Valcam, Page, Midilli. Estas pesquisas são fundamentais no aperfeiçoamento de modelos para simulação matemática da secagem de produtos agrícolas. Os modelos de simulação são, comumente, fundamentados na hipótese de que a camada espessa é composta por uma soma de camadas finas, por consequência, é necessária uma equação explicando a taxa de redução de água de uma camada fina para simulação de secagem em camada espessa (KASHANINEJAD et al., 2007).

As pesquisas sobre cinética de secagem têm motivado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos. Na literatura, são apresentados muitas metodologias (teóricas, semiempíricas e empíricas), para se estudar a secagem de produtos agrícolas: sementes de crambe (FARIA et al., 2012), sementes de abóbora (SACILIK, 2007), sementes de amaranto (ABALONE; GASTÓN; CASSINERA, 2006), grãos de trigo parboilizados (MOHAPATRA; RAO, 2005), dentre outros (DI SCALA; CRAPISTE, 2008; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2010; BURMESTER; EGGERS, 2010; PUTRANTO et al., 2011; NILNONT et al., 2012; ISQUIERDO et al., 2013).

As metodologias semiempíricas e empíricas de análise do processo de secagem, que usualmente baseiam-se nas condições externas ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem, entretanto não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e massa no interior dos grãos e considera-se que todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014).

Essas metodologias baseiam-se, comumente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, acreditando-se que, durante a secagem, as condições são isotérmicas e que a transferência de água se restringe a superfície do produto. Já os métodos teóricos, normalmente, consideram não somente as condições externas, mas também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos (ANDRADE; BORÉM, 2008).

Apesar de várias teorias terem sido propostas, para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes, os métodos semiempíricos e empíricos têm se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as faixas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar das quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Numerosos modelos têm sido ajustados para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos. Dentre eles, estão os modelos de Midilli, Page,

Thompson, Verma, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis modificado, dois termos, exponencial de dois termos, Newton, Wang e Sing e Valcam (MOHAPATRA; RAO, 2005; AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; KASHANINEJAD et al., 2007; GONELLI et al., 2009; RESENDE et al., 2009, 2011; RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010; CORRÊA et al., 2010b; SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012, 2013; ISQUIERDO et al., 2013).

Alguns pesquisadores ajustaram modelos para melhor caracterizar os processos de secagem. Henderson e Pabis (1961) constataram que a constante de secagem poderia ser expressa por uma equação do tipo Arrhenius, verificaram a relação com dados experimentais em trigo e milho. Bala (1983) observou que a constante de secagem do malte foi altamente correlacionada à temperatura do ar na faixa de 30,3 a 90,2 °C e também pode ser melhor representada por uma equação do tipo Arrhenius.

## **2.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A lixiviação de soluções citoplasmáticas pode ocasionar a desorganização e desestruturação das membranas celulares. A remoção da água durante a secagem, estimula a parede celular à contração e reduz o volume celular, ocasionando uma aglomeração dos componentes citoplasmáticos, transformando o conteúdo da célula consideravelmente viscoso (HOEKSTRA et al., 2001; SAATH et al., 2010).

Em consequência da exposição do produto a altas temperaturas e taxas de secagem empregadas podem ocorrer modificações fisiológicas, químicas e físicas durante a secagem. Essas modificações poderão resultar na perda da integridade das membranas celulares (RIBEIRO et al., 2003; SAATH et al., 2010; BORÉM et al., 2013), afetando assim sua qualidade.

Verifica-se em alguns estudos, que a membrana celular dos grãos de café é um dos primeiros pontos de injúria ultraestruturais de tecidos, após dessecação (SAATH et al., 2010). Na secagem lenta devido ao tempo para indução e à operação dos mecanismos de proteção das membranas observa-se uma maior tolerância à dessecação de grãos de café. Estes estudos, são capazes de contribuir na compreensão dos processos de redução de qualidade durante a secagem, tal como as das paredes celulares do endosperma (BORÉM et al., 2008; MARQUES et al., 2008).

A perda da qualidade da bebida do café está geralmente associada às deteriorações provocadas pela secagem do mesmo. A desorganização e desestruturação das membranas

celulares são consequências desta perda de qualidade, os quais facilitam o contato de componentes químicos com as enzimas oxidativas e hidrolíticas, que estão correlacionados aos processos fermentativos, prejudicando o aroma e sabor da bebida (SAATH et al., 2010). Desta maneira, para alcançar cafés de melhor qualidade é necessário a verificação das propriedades de secagem, bem como o momento que este fenômeno ocorre durante a secagem.

Por meio da MEV, técnica em análises ultraestruturais de grãos de café, pode-se comprovar que o ar de secagem à temperatura de 60°C influencia de maneira negativa a qualidade, ocasionando rupturas nas membranas celulares, o resultado dessas rupturas é o extravasamento de parte do protoplasma, substância viva da célula, nos espaços intercelulares e no interior das células. Entretanto, não se pôde analisar o instante das rupturas (Marques, 2006).

Borém et al. (2013) constataram que não houve dano na integridade da estrutura celular, utilizando as temperaturas 50°C e 60°C no início do processo de secagem até o teor de água de 0,428 b.s., sucessivo da temperatura de 40°C até o teor de água de 0,123 b.s., para cafés despulpados. Todavia, verificou-se extravasamento intercelular quando iniciado a secagem à 40°C e finalizado a etapa à 60°C. Situação que ratifica Saath et al. (2010), onde sucedeu-se durante o final da secagem os maiores danos causados pelo uso da temperatura de 60°C.

Borém et al. (2008) avaliaram que através de estudos ultraestruturais de microscopias eletrônicas de varredura, foi mantido a totalidade das membranas celulares nos endospermas dos cafés natural e despulpado, durante a secagem à temperatura de 40°C e em terreiro, e quando os mesmos foram secados com temperatura de 60°C, essas membranas foram danificadas apenas entre os teores de água de 0,428 e 0,250 b.s.

## REFERÊNCIAS

- ABALONE, R.; GASTÓN, A.; CASSINERA, A. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, London, v. 93, p. 179-188, 2006.
- ABDELMOTALEB, A. Thin layer drying of garlic slices using convection and combined (convection - infrared) heating modes. **Misr Journal of Agricultural Engineering**, Cairo, v. 26, n. 1, p. 251-281, Jan. 2009.
- AGHBASHLO, M. et al. A review on exergy analysis of drying processes and systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 22, p. 1-22, 2013.
- AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables. **Food Engineering**, Dordrecht, v. 3, n. 3, p. 103-108, 2010.
- ALVES, G. E. **Cinética de secagem e qualidade do café para diferentes temperaturas e fluxos de ar**. 2013. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- ALVES, G. E. et al. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 238-247, 2013.
- ALVES, G. E. et al. Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 39, n. 2, p. 225-233, 2017.
- ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, Niterói, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.
- ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. Modelagem matemática e simulação aplicada na secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 301-347.
- ARÉVALO-PINEDO, A.; MURR, F. E. X. Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 4, p. 636-643, 2005.
- ATHIÉ, I.; CASTRO, M. F. P. M.; GOMES, R. A. R.; VALENTIN, S. R. de T. **Conservação de Grãos**. Campinas: Fundação Cargil, 1998. 236 p.
- AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, London, v. 91, n. 8, p. 76-87, 2016.
- BALA, B.K. 1983. **Deep bed drying of malt**. Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne.
- BORÉM, F. M. **Handbook of coffee post-harvest technology**. Norcross: Gin, 2013.
- BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. v. 1, 631 p.

BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café submetido a diferentes temperaturas, fluxos de ar e períodos de pré-secagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 55-63, 2006.

BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T.; ISQUIERDO, E. P. Coffee drying. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Handbook of coffee post-harvest technology**. Georgia: Norcross, 2014. p. 97-118.

BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultra structural analysis damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 99, n. 1, p. 62-66, Feb. 2008.

BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 205-240.

BRANDO, C. H. J. Harvesting and green coffee processing. In: WINTGENS, J. N. (Ed.). **Coffee: growing, processing, sustainable production**. Wiley: VCH, 2004. p. 605-714.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992.

BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. **Sobre a BSCA**. Disponível em: <<http://bsca.com.br/cafes-especiais.php>>. Acesso em: 21 set. 2018.

BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 99, n. 4, p. 430-436, 2010.

CAMICIA, R. G. D. M. et al. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3, p. 206-214, 2015.

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

CLEMENTE, A. DA C. S. et al. Post-Harvest operations and physicochemical and sensory quality of coffees. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 233 - 241, abr./jun. 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café, safra 2019 primeira estimativa, jan/2019**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica*L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010a.

CORRÊA, P. C. et al. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in diferente processing levels. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 45, p. 2016-2022, 2010b.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.

DEBS-LOUKA, E. et al. Deshydratation de la carotte (*Daucus carota* L.) effet d ' un nouveau proceed sur les composes lipidiques et la microstructure. **Sciences des Aliments**, Paris, v. 16, n. 5, p. 491-503, 1996.

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 41, n. 5, p. 789-795, 2008.

DONG, W. et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. **Food Chemistry**, London, v. 234, n. 6, p. 121-130, 2017.

DOYMAZ, I. Convective drying kinetics of strawberry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Lausanne, v. 47, n. 5, p. 914-919, 2008.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Cleveland, v. 50, n. 5, p. 441-464, Apr. 2010.

FARIA, R. Q. de et al. Drying kinetics of crambe seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FERREIRA, F. C.; SILVEIRA JUNIOR, V. Secagem a vácuo a diferentes pressões: avaliações físicas e sensoriais de manjeriço. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 59-65, 1999.

FIGUEIREDO, L. P. et al. Fatty acid profiles and parameters of quality of specialty coffees produced in different Brazilian regions. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 10, n. 35, p. 3484-3493, Aug. 2015.

FIGUEIREDO, L. P. et al. The potential for high quality bourbon coffees from different environments. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 5, n. 10, p. 87, Sept. 2013.

FIGUEIREDO, L. P. **Perfil sensorial e químico dos genótipos de cafeeiro Bourbon de diferentes origens geográficas**. 2010. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

GIOMO, G. S.; BORÉM, F. M. Cafés especiais no Brasil: opção pela qualidade. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 7-16, 2011.

GONELLI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 11, p. 64-73, 2009. Edição especial café.

GUIMARÃES, A. C. **Secagem de café (*Coffea arabica* L.) combinando sistemas em altas e baixas temperaturas**. 1995. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, p. 169-174, 1961.

HERMAN-LARA, E. et al. Effect of airflow reversal on packed-bed drying of carrots. **Journal of Food Process Engineering**, Westport, v. 33, n. 4, p. 684-700, 2010.

HERNÁNDEZ-DÍAZ, W. N. et al. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 86, n. 1, p. 1-9, 2008.

HOEKSTRA, F. A.; GOLOVINA, E. A.; BUITINK, J. Mechanisms of plant desiccation tolerance. **Trends Plant Science**, Oxford, v. 6, n. 9, p. 431-438, Sept. 2001.

ISQUIERDO, E. P. et al. Quality of natural coffee subjected to diferente rest periods during the drying process. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 4, p. 439-445, jul./ago. 2012.

ISQUIERDO, E. P. et al. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

JANGAM, S. V. An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. **Drying Technology**, New York, v. 29, n. 12, p. 1343-1357, 2011.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, Feb. 2007.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. International Series of Monographs in Chemical Engineering, vol. 13. Oxford: Pergamon Press. 1972. 358p.

KOMPANY, E. et al. New drying method of fruits and vegetables: quality improvement of the final product. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 1990, Bethesda. **Proceedings...** Bethesda, 1990. 1 CD-ROM.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, New York, v. 15, n. 10, p. 2441-2458, 1997.

KUTOVOY, V.A.; MUMINOV, M.I.; KARIMOV, M.; SANDALOV, V.N. Intensification of vacuum drying of bioproducts. In **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Inter-American Drying Conference, IADC 2005**, Orsat V, Raghavan GSV, Kudra T (eds). Published by McGill University: Montreal, Canada, 2005; Paper II-1.

LASSERAN, J. C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 3, n. 3, p. 17-45, 1978.

LEE, J. H.; KIM, H. J. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 42, n. 1, p. 180-186, 2009.

MALTA, M. R. Processamento e qualidade do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 66-75, 2011.

MALTA, M. R. et al. Qualidade do café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 21, n. 5, p. 431-440, 2013.

- MARQUES, E. R. **Alterações químicas, sensoriais e microscópicas do café cereja descascado em função da taxa de remoção de água**. 2006. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- MARQUES, E. R. et al. Eficácia do teste de acidez graxa na avaliação da qualidade do café arábica (*Coffea arabica* L.) submetidos a diferentes períodos de temperatura e pré-secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1557-1562, set./out. 2008.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, p. 1503-1513, 2002.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- NILNONT, W. et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica* L.) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Essex, v. 20, p. 341-350, Apr. 2012.
- OLIVEIRA, G. H. H. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 45, n. 3, p. 546-554, Mar. 2010.
- OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- ORIKASA, T. et al. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 125, n. 1, p. 51-58, 2014.
- ORNELLAS, L. H. **Técnicas dietéticas: seleção e preparo de alimentos**. 7. ed. rev. e ampl. São Paulo: Atheneu, 2001. 510 p.
- PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: J. Wiley, 1998. 303 p.
- PAN, Y.K.; ZHAO, L.J.; DONG, Z.X.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Intermittent drying of carrot in a vibrated fluid bed: effect on product quality. **Drying Technology**, v. 17, n. 10, p. 2323 – 2340. 1999.
- PORCIUNCULA, B. D. **Controle da microestrutura e textura na desidratação de banana usando ciclos de aquecimento - pulso de vácuo**. Tese (doutorado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 2014.
- PUHL, J.; NITZKE, J. A. **Secagem a vácuo: Alimentos**. Disponível em: [http://www.ufrgs.br/alimentus1/objetos/veg\\_desidratados/b\\_vacu.html](http://www.ufrgs.br/alimentus1/objetos/veg_desidratados/b_vacu.html) Acesso em: 24 abril, 2019
- PUTRANTO, A. et al. Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 105, n. 4, p. 638-646, 2011.

- REIS, F. R.; MASSON, M. L.; WASZCZYNSKYJ, N. Efeitos da secagem convectiva e a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de beringela. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 163-169, ago. 2006.
- RESENDE, O. et al. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea Canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.
- RESENDE, O. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatro phacurcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.
- RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 12, p. 171-178, 2010.
- RIBEIRO, D. M. et al. Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 28, n. 7, p. 94-107, 2003.
- RIBEIRO, F. C. et al. Storage of green coffee in hermetic packaging injected with CO<sub>2</sub>. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v. 47, n. 4, p. 341-348, Oct. 2011.
- ROCHA, H. A. **Secagem a vácuo de cafés descascados: cinética de secagem e efeitos fisiológicos**. 2018. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- SAATH, R. et al. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, jan./fev. 2010.
- SAATH, R. et al. Alterações na composição química e sensorial de café (*Coffea arabica* L.) nos processos pós-colheita. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 2, p. 96-112, abr./jun. 2012.
- SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 79, n. 1, p. 23-30, 2007.
- SANTOS, A. E. et al. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia fícus indica*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 11, n. 1, p. 1-6, 2016.
- SELMAR, D.; BYTOF, G.; KNOPP, S. E. The storage of green coffee (*Coffea Arabica* L.): decrease of viability and changes of potential aroma precursors. **Annals of Botany**, Oxford, v. 101, n. 1, p. 31-38, Jan. 2008.
- SILVA, J. de S.; BERBERT, P. A. **Colheita, secagem e armazenagem de café**. Viçosa: Aprenda Fácil, 1999. 146 p.

SILVEIRA, H. R. O. **Variação sazonal de atributos ecofisiológicos e metabólicos de café arábica em três altitudes**. 2014. 73 p. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of Jatropha seeds. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Londrina, v. 34, n. 3, p. 231-238, 2012b.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.

SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D. S. Drying of Foodstuffs. In: MUJUNDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3<sup>th</sup> Edition, CRC Press, 2006, p. 522-545.

SWASDISEVI, T.; DEVAHASTIN, S.; NGAMCHUM, R.; SOPONRONNARIT, S. Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, v. 29, n. 3, p. 809-816, 2007.

TAVEIRA, J. H. da S. et al. Perfis proteicos e desempenho fisiológico de sementes de café submetidas a diferentes métodos de processamento e secagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 10, p. 1511-1517, out. 2012.

TOLEDO, R. A. et al. Relationship between the different aspects related to coffee quality and their volatile compounds. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 15, p. 705-719, Apr. 2016.

VILLELA, F. A.; PESKE, S. T. Secagem de sementes. In: PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G. (Ed.). **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas: Ed. UFPel, 2003. p. 283-321.

WINTGENS, J. N. **Coffee: growing, processing, sustainable production**. Weinheim: Wiley VCH, 2004. 711 p.

WU, L. et al. Vacuum drying characteristics of eggplants. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 83, n. 3, p. 422-429, 2007.

ZHANG, L. et al. Effects of drying methods on the nutritional aspects, flavor, and processing properties of Chinese chestnuts. **Journal Food Science Technology**, India v. 55, n. 9, p. 3391-3398, Sep. 2018.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS****ARTIGO 1 – ALTERAÇÕES ULTRAESTRUTURAIS DE GRÃOS DE CAFÉ  
DESPOLPADO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES PRESSÕES ABSOLUTAS NA  
SECAGEM A VÁCUO**

## RESUMO

Devido a importância da secagem na fase da pós-colheita do café e seu reflexo na qualidade final do produto, objetivou-se, neste trabalho, avaliar a cinética e os efeitos fisiológicos causados pela secagem à vácuo de cafés despulpados. Para a condução do experimento, foram colhidos frutos de café (*Coffea arabica* L. cv. Topázio MG 1190) selecionando apenas frutos maduros. Esses foram descascados mecanicamente (processamento via úmida) e posteriormente colocados em recipientes plásticos (baldes de 25 litros) junto com água onde ficaram por 24 horas para o despulpamento. Após esse período, o café em pergaminho foi secado em estufa a vácuo sob pressões absolutas de 147, 247, 347, 447 e 747 mmHg (em pressão atmosférica local de 747 mmHg) e temperatura do ar de secagem de  $35\pm 1$  e  $40\pm 1$ °C. Para analisar os efeitos fisiológicos, os cafés foram avaliados através de microscopia eletrônica de varredura. A diminuição da pressão absoluta proporcionou a redução do tempo de secagem e um aumento da taxa de redução de água média e máxima, tanto para a temperatura do ar de secagem de 35°C como para a temperatura do ar de secagem de 40°C. O tempo gasto para a secagem do café, considerando a mesma temperatura do ar de secagem é, estatisticamente, diferente para todas as pressões, exceto para as pressões de 347 e 447 mmHg, para a temperatura de 40°C, que são iguais. Por meio das eletromicrografias foi possível observar a diferença da parede celular dos grãos de acordo com a redução do vácuo. Para a pressão absoluta de 347 mmHg, notou-se poucos danos nas membranas celulares, proporcionando assim, uma condição adequada para a secagem de cafés despulpados, reduzindo em até 19% no tempo de secagem em relação à pressão local (atmosférica).

**Palavras-chave:** Pós-colheita. Secagem a vácuo. Café despulpado. Taxa de redução de água. Efeitos fisiológicos.

## ULTRASTRUCTURAL CHANGES OF PULPED COFFEE GRAINS DUE TO DIFFERENT ABSOLUTE PRESSURES IN VACUUM DRYING

### ABSTRACT

Due to the importance of drying in the coffee postharvest phase and its reflection on the final quality of the product, the aim of this study was to evaluate the kinetics and physiological effects caused by vacuum drying of pulped coffee. To conduct the experiment, coffee fruits (*Coffea arabica* L. cv. Topázio MG 1190) were harvested, selecting only ripe fruits. These were mechanically peeled (wet processing) and then placed in plastic containers (25 liter buckets) along with water where they remained for 24 hours for pulping. After this period, the parchment coffee was dried in a vacuum oven under absolute pressures of 147, 247, 347, 447 and 747 mmHg (at local atmospheric pressure of 747 mmHg) and drying air temperature of  $35\pm 1$  and  $40\pm 1$ °C. To analyze the physiological effects, the coffees were evaluated by scanning electron microscopy. Decreasing absolute pressure reduced drying time and increased average and maximum water reduction rate for both the drying air temperature of 35°C and the drying air temperature of 40°C. The time taken for coffee drying, considering the same drying air temperature, is statistically different for all pressures except 347 and 447 mmHg, for the 40°C temperature, which are equal. Through the micrographs it was possible to observe the difference of the grain cell wall according to the vacuum reduction. For the absolute pressure of 347 mmHg, little damage to the cell membranes was noted, thus providing a suitable condition for the drying of pulped coffee, reducing up to 19% in the drying time in relation to the local (atmospheric) pressure.

**Keywords:** Postharvest. Vacuum drying. Pulped coffee. Water reduction rate. Physiological effects.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é o líder em produção e exportação de café. Todavia, os cafés brasileiros ainda são considerados como comuns, de baixa qualidade e pouca distinção, obtendo um valor mais baixo no mercado exterior. Desse modo, a qualidade do produto é um aspecto essencial na obtenção de novos mercados.

Essa qualidade depende de alguns fatores, que vão da escolha da cultivar até o preparo da bebida para o consumo. Dentre esses fatores, o processamento, a secagem, o armazenamento e o beneficiamento são essenciais para a manutenção e a obtenção de um produto final distinto.

De todas as etapas da pós-colheita do café, a secagem é a etapa de maior relevância, tanto na perspectiva do consumo de energia e geração de custos de processamento, como na perspectiva da manutenção da qualidade do produto (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014; DONG et al., 2017).

Alves et al. (2017) confrontaram variáveis fisiológicas (condutividade elétrica, lixiviação de potássio e porcentagem de germinação), com variáveis de cinética de secagem (tempo e taxa de redução de água) e com análise sensorial. Constataram a maior sensibilidade de cafés naturais à secagem mecânica, indicando os piores desempenhos fisiológicos. No mesmo estudo, o fluxo de ar não prejudicou a qualidade fisiológica; a elevação da temperatura de 40°C para 45°C, em cafés despulpados, apresentou queda na qualidade fisiológica.

No decorrer da secagem, conforme a temperatura e taxas de redução de água empregadas podem acontecer transformações químicas, físicas e fisiológicas nos grãos, que poderão provocar uma desorganização ou alterações da seletividade das membranas celulares (RIBEIRO et al., 2003).

Com a tecnologia acessível para a secagem do café, na atualidade, a elevação da taxa de redução de água somente é possibilitada com o aumento da temperatura ou do fluxo de ar. Contudo, temperaturas superiores à 40 °C na massa de café provocam danos térmicos que reduzem a qualidade do café (TAVEIRA, 2009; OLIVEIRA, 2010; ISQUIERDO et al., 2013). Uma alternativa para aumentar a taxa de redução de água sem ultrapassar o limite máximo de temperatura tolerável pelo café pode ser o uso de pressão sub-atmosférica.

A secagem a vácuo é uma alternativa à secagem convencional, já que em alguns casos, a exposição prolongada em uma secagem convectiva costuma provocar danos térmicos aos grãos. Métodos de secagem menos agressivos, como a secagem a vácuo apresentam menores alterações químicas e bioquímicas nos alimentos quando comparados aos métodos de secagem com ar quente (AGHBASHLO et al., 2013; ORIKASA et al., 2014).

Diante disso, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a correlação entre um grupo de variáveis de cinética de secagem (tempo e taxa de redução de água) e os efeitos causados pela secagem a vácuo de cafés despulpados, em função da temperatura do ar de secagem, da pressão absoluta utilizados e de imagens de microscopia eletrônica de varredura.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Procedimento experimental

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas (LPPA) do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foi utilizado o café (*Coffea arabica* L. cv. Topázio MG 1190) colhido manualmente em uma lavoura no campo experimental da Universidade Federal de Lavras, em Lavras – MG. Os frutos foram colhidos no estágio de maturação cereja. Após a colheita, os frutos foram separados, em água, por diferença de densidade, removendo-se os de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados). Após a separação hidráulica, uma nova seleção manual foi realizada para garantir que as amostras sejam constituídas somente por frutos maduros. Os frutos maduros selecionados foram descascados mecanicamente (processamento via úmida). O despulpamento foi efetuado pela imersão em água em recipientes plásticos (baldes de 25 litros) por 24 horas. Após o processamento, o café em pergaminho foi, então, levado para a estufa de vácuo onde os cafés em pergaminho foram secos até a faixa de teor de água de  $0,125 \pm 0,005$  kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (bs).

### 2.2 Sistema de secagem

Os experimentos de secagem foram realizados em uma estufa à vácuo (modelo SL-104/40, da marca SOLAB, de Piracicaba/SP - Brasil), com capacidade de 40 litros e apresentada na Figura 1. Foram avaliadas duas temperaturas de secagem,  $35 \pm 1$  e  $40 \pm 1$  °C e cinco diferentes pressões absolutas: 147, 247, 347, 447 e 747 mmHg (pressão local). Dentro da estufa o café em pergaminho foi distribuído em quatro sacos de malha de poliéster contendo 100 gramas de grãos em cada um. Cada saco foi considerado como uma repetição.

A temperatura das amostras de café foi medida com o auxílio de termômetros de mercúrio inseridos no centro da massa. Em tempos pré-determinados, as amostras de café tiveram suas massas mensuradas utilizando uma balança analítica com resolução de 0,01g. A posição dos sacos foi rotacionada em cada abertura da estufa para pesagem.

A umidade relativa do ar de secagem dentro da estufa foi medida com o auxílio de um termohigrômetro digital portátil (modelo Datalogger, da marca Zetta Tronnic, de São Paulo/SP - Brasil), com sensor inserido no interior da estufa. Partículas de dióxido de silício em massa igual a massa total de café em cada experimento, foi colocado no interior da estufa com a

intenção de que a umidade retirada do café durante a secagem não saturasse a atmosfera interna da estufa. Estas partículas eram substituídas a cada 10 horas de secagem, considerando sempre igual a massa com relação a massa total das amostras em cada instante de secagem.

Figura 1 - Estufa à vácuo do modelo SL-104/40.



Fonte: Do autor (2019).

Após a secagem e resfriamento, o café em pergaminho permaneceu armazenado em sacos de polietileno em ambiente com temperatura de 10°C e 50% de umidade relativa do ar (câmara fria), sendo beneficiado apenas no momento da realização das análises fisiológicas para avaliação da qualidade do café.

### 2.3 Teor de água

Após a colheita e o processamento, amostras do café em pergaminho foram submetidas à determinação do teor de água inicial, pelo método padrão de estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  durante 24 horas, como estabelecido nas Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009). Já o teor de água do café seco beneficiado e do endosperma foram determinados pelo método padrão ISO 6673 (International Organization For Standardization - ISO, 2003).

O teor de água das amostras a qualquer tempo foi calculado por meio da Equação 1 descrita abaixo:

$$U_t = \frac{m_{ai} - (m_{ti} - m_{tt})}{m_{ms}} \quad (1)$$

Onde:

$U_t$ : Teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (b.s.));

$m_{ai}$ : Massa de água inicial (kg);

$m_{ti}$ : Massa total inicial (kg);

$m_{tt}$ : Massa total no tempo t (kg);

$m_{ms}$ : Massa de matéria seca (kg).

## 2.4 Taxa de redução de água

A taxa de redução de água, correspondente à variação de teor de água com o tempo, foi calculada de acordo com a equação 2:

$$TRA = \frac{U_{ant} - U_{at}}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde:

TRA: Taxa de redução de água (kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>);

$U_{ant}$ : teor de água no tempo anterior (kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (b.s.));

$U_{at}$ : teor de água atual (kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (b.s.));

$\Delta t$ : intervalo de tempo entre as pesagens (h).

## 2.5 Razão de umidade

A evolução dos processos de secagem com o tempo pode ser definida com base na razão de umidade (RU) (Equação 3). Valores de razão de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados aos modelos utilizados para descrever a cinética de secagem dos grãos de café apresentados na Tabela 1.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (3)$$

Onde:

RU: Razão de umidade (adimensional);

U: Teor de água do produto no tempo t (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.)).

O teor de água de equilíbrio higroscópico será calculado pela Equação 4, para o café despulpado (AFONSO JUNIOR, 2001):

$$U_e = (2,9636 + 0,0530 * T - 10,7837 * UR^{4,5136})^{-1,6503} \quad (4)$$

Onde:

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

T: temperatura do ar de secagem (°C);

UR: umidade relativa do ar de secagem (decimal).

## 2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A preparação e a observação das amostras em microscópio eletrônico de varredura foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME), localizado no Departamento de Fitopatologia/UFLA. Para as amostras foram selecionados aleatoriamente 4 grãos de café dos tratamentos. Em seguida esses grãos foram cortados longitudinalmente e imersos em solução fixativa (Karnovisk modificado), pH 7,2 e armazenadas em câmara fria, até a realização das análises. Em seguida, foram transferidos para líquido crioprotetor (glicerol 30%) por 30 minutos e cortadas transversalmente em nitrogênio líquido. As secções obtidas foram transferidas para uma solução de tetróxido de ósmio 1% em água por 1 hora e, subsequentemente, desidratadas em série de acetona (25%, 50%, 75%, 90% e 100%, por três vezes) e depois levadas para o aparelho de secagem em ponto crítico. Os espécimes obtidos foram montados em suportes de alumínio “stubs”, utilizando fita de carbono

colocada sobre uma película de papel alumínio, cobertos com ouro e observados em microscópio eletrônico de varredura LEO EVO 40 XVP. Foram geradas e registradas digitalmente, a aumento fixo de 750 vezes, diversas imagens para cada amostra, nas condições de trabalho de 20 kV e distância de trabalho entre 7,5 e 8,5 mm. As imagens geradas foram gravadas e abertas no Software Photopaint do pacote Corel Draw®, onde foram selecionadas e preparadas as micrografias apresentadas neste trabalho.

## **2.7 Delineamento experimental**

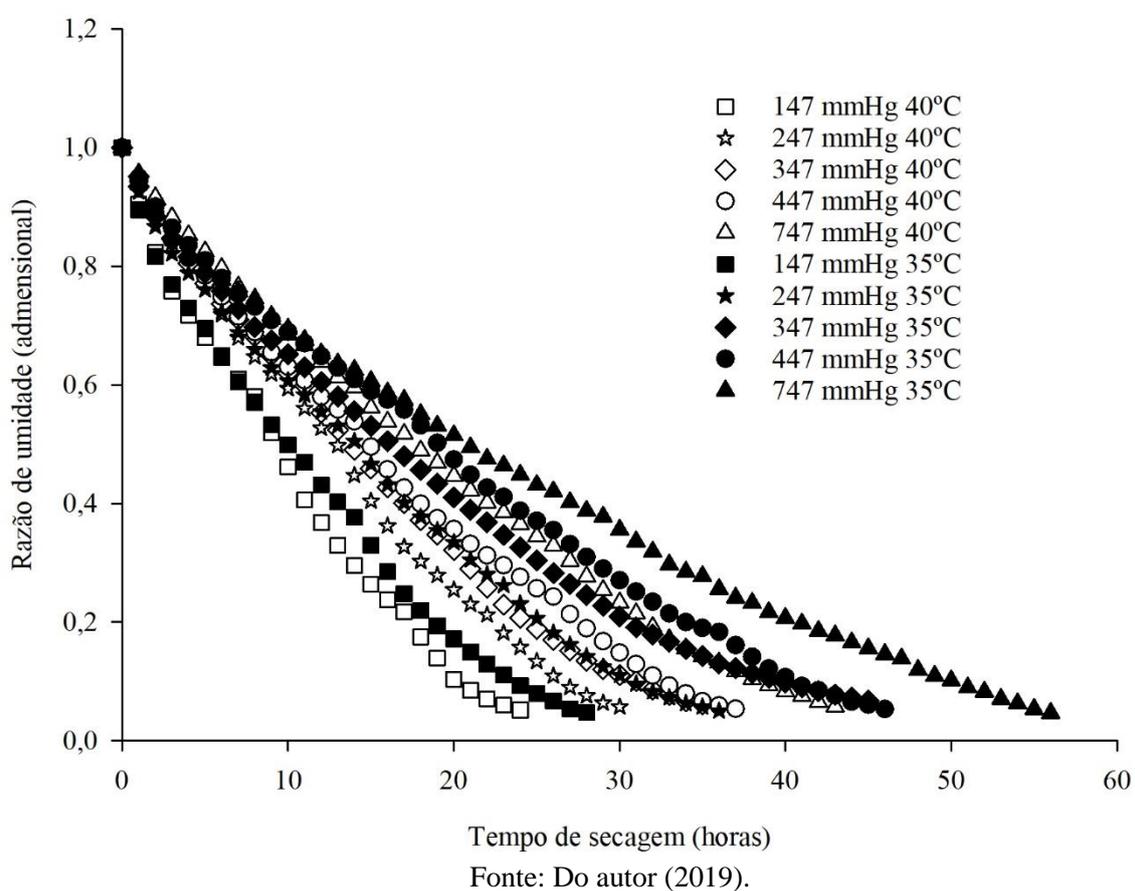
Os tempos de secagem encontrados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial, tendo como fatores as diferentes temperaturas (35 e 40°C), as pressões absolutas (747, 447, 347, 247 e 147 mmHg) com quatro repetições, totalizando 40 amostras. Em blocos casualizados, e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância, utilizando-se o programa SISVAR® (FERREIRA, 2011).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Caracterização da secagem

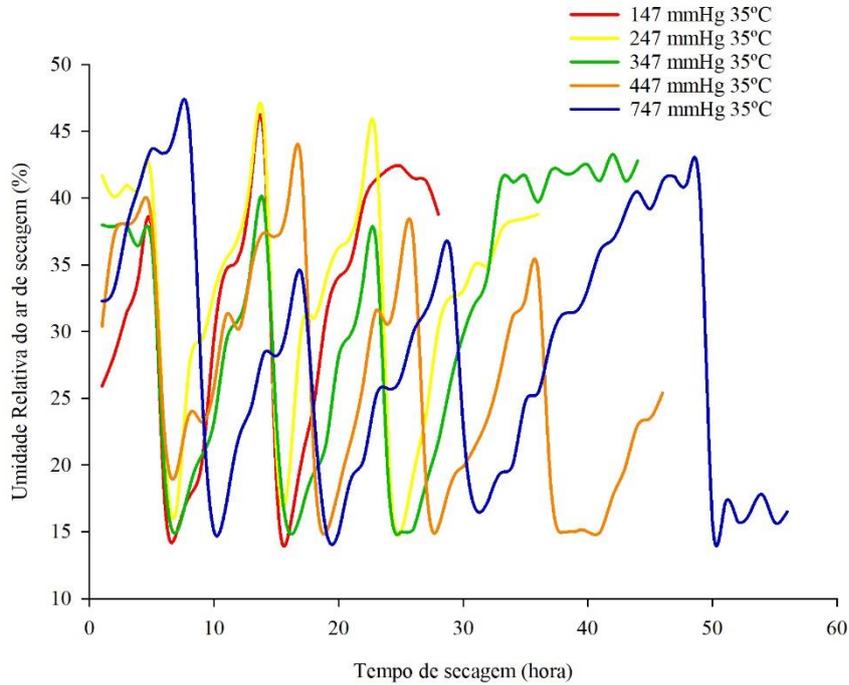
São apresentados na Figura 2, os valores de razão de umidade obtidos durante a secagem a vácuo.

Figura 2 - Valores de razão de umidade observados durante a secagem do café despolpado, em função do tempo.



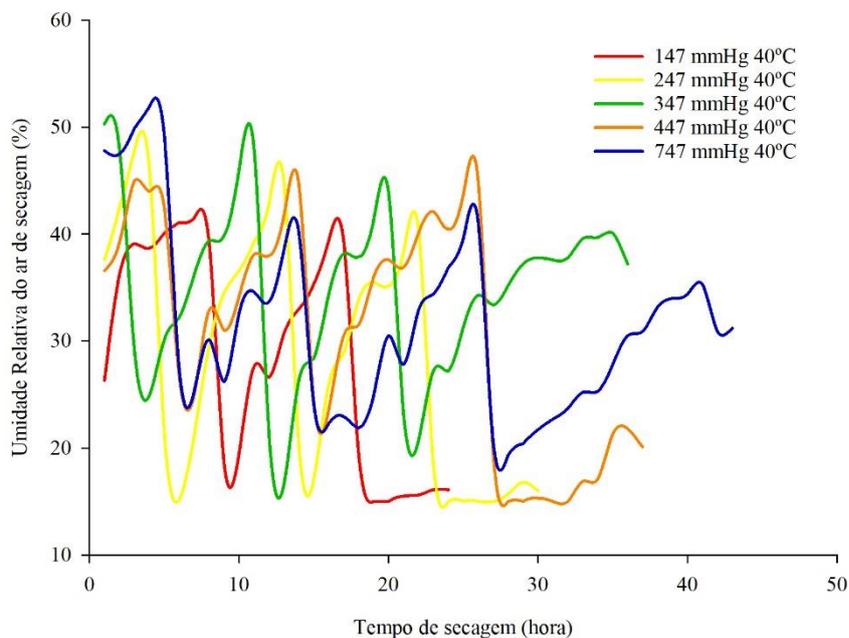
Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os valores de umidade relativa do ar obtidos durante a secagem a vácuo.

Figura 3 - Valores de umidade relativa do ar de secagem, para as pressões absolutas estudadas e temperatura de 35°C, observados durante a secagem do café despulpado, em função do tempo.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 4 - Valores de umidade relativa do ar de secagem, para as pressões absolutas estudadas e temperatura de 40°C, observados durante a secagem do café despulpado, em função do tempo.



Fonte: Do autor (2019).

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dos tempos de secagem, teores de água inicial e final dos grãos de café e taxas de reduções de água máxima e média em função das pressões absolutas.

Tabela 1 – Valores médios do teor de água, umidade relativa média do ar de secagem, taxa de redução de água e tempo de secagem dos cafés despulpados em função das pressões absolutas.

Tratamento		Teor de água (b.s.)		Umidade Relativa Média do Ar (%)	Taxa de redução (kg.kg <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )		Tempo de secagem (h)
Temperatura (°C)	Pressão (mmHg)	Inicial	Final		Máxima	Média	
40±1	147	1,11	0,124	28,5	0,099	0,041	23,3
	247	1,11	0,128	28,7	0,060	0,033	29,5
	347	1,11	0,130	34,8	0,059	0,028	35,8
	447	1,11	0,125	30,9	0,058	0,027	36,5
	747	1,04	0,125	31,6	0,042	0,021	42,8
35±1	147	1,04	0,121	31,4	0,101	0,033	27,3
	247	1,09	0,127	32,9	0,075	0,027	35,5
	347	1,10	0,130	30,8	0,068	0,022	44,5
	447	1,10	0,130	26,5	0,052	0,021	46
	747	1,10	0,123	28,5	0,051	0,017	55,3

Fonte: Do autor (2019).

Nota-se, na Tabela 1, que o tempo de secagem em experimentos realizados com temperatura do ar de secagem de 40±1°C foi menor que o de tratamentos à 35±1°C, para todas as pressões absolutas analisadas. Os tempos de secagem, para as pressões absolutas em estudo, variaram de 27,3 a 55,3 horas e 23,3 a 42,8 horas para as temperaturas de 35±1 e 40±1°C, respectivamente.

Observa-se que quanto menor a pressão, menor foi o tempo de secagem para ambas as temperaturas de secagem. O tratamento com temperatura do ar de secagem de 40±1°C e 147 mmHg de pressão absoluta, proporcionou uma redução de 21% em relação ao tempo obtido pela pressão absoluta de 247 mmHg de, 35% em relação ao tempo obtido pela pressão absoluta de 347 mmHg, 36% em relação ao tempo obtido pela pressão absoluta de 447 mmHg e 46% em relação ao tempo obtido pela pressão absoluta de 747 mmHg de pressão absoluta (pressão atmosférica). Para a temperatura de 35±1°C, a pressão absoluta de 147 mmHg proporcionou uma redução no tempo de secagem de 23% em relação ao tempo obtido pela pressão absoluta de 247 mmHg, 39% em relação a pressão absoluta de 347 mmHg, 41% em relação a pressão absoluta de 447 mmHg e 51% em relação a pressão absoluta de 747 mmHg (pressão

atmosférica). Dessa forma, a tendência do efeito da pressão absoluta é variável em relação ao efeito da temperatura.

Houve uma redução no tempo de secagem comparando-se a mesma pressão variando a temperatura. Variando a pressão absoluta, notou-se um aumento na redução do tempo de secagem (Tabela 1). Para a pressão absoluta de 147 mmHg e temperatura de  $40\pm 1^\circ\text{C}$ , há uma redução de 15% no tempo de secagem em relação a temperatura de  $35\pm 1^\circ\text{C}$ , para a pressão absoluta de 247 mmHg uma redução de 17%, para a pressão absoluta de 347 mmHg uma redução de 20%, para a pressão absoluta de 447 mmHg uma redução de 21% e para a pressão absoluta de 747 mmHg (pressão atmosférica) uma redução de 23%.

Devido ao aumento da temperatura do ar de secagem, há uma maior diferença entre a pressão de vapor do produto e do ar de secagem, motivo pelo qual, a remoção da água aconteça com mais facilidade e rapidez (SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012b). Ainda em função do aumento da temperatura, são conferidos à redução do tempo de secagem os fatores: o aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente a resistência do fluido ao escoamento e a diminuição da viscosidade favorece a difusão das moléculas de água nos capilares do produto (CORRÊA et al., 2010), além de possibilitar um aumento no nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para a elevação da taxa de redução de água.

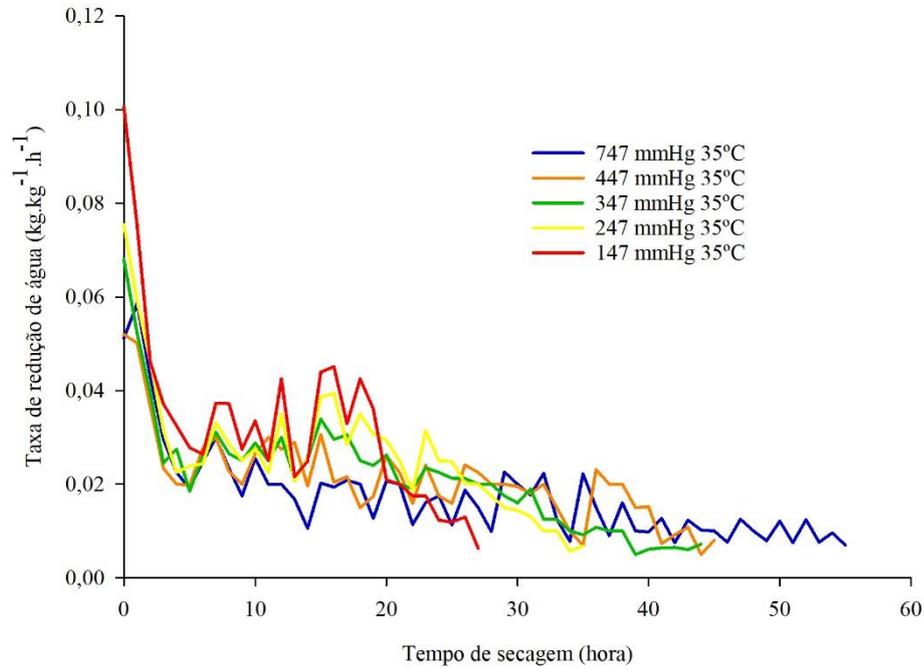
Horecki et al. (2018), estudando diferentes tipos de secagem para Cornelian cerejas (*Cornus mas L.*) concluíram que a secagem a vácuo se mostrou mais adequada do que a liofilização, por ser mais econômica e ter um menor tempo de secagem, com base nos resultados dos indicadores físico-químicos obtidos na secagem a vácuo.

A secagem de pólen de abelha observada por Kayacan, Sagdic e Doymaz (2018) também obtiveram uma redução do tempo de secagem pelo uso de pressão reduzidas e ao comparar com a secagem convectiva, observou-se uma expressiva redução no tempo de secagem comparado com o uso de vácuo.

Zhang et al. (2018), investigaram o efeito de cinco métodos de secagem, incluindo a secagem a vácuo, sobre a composição nutricional, sabor e propriedades funcionais de castanhas chinesas. Eles também alcançaram resultados semelhantes a este trabalho, onde observaram uma taxa de secagem mais rápida, um baixo consumo de energia e a melhoria da qualidade dos produtos de castanha chinesa pelo método a vácuo. Reforçando os dados encontrados, Rocha (2018), estudando o efeito do vácuo no café descascado, comprovou a redução em até 50% do tempo de secagem.

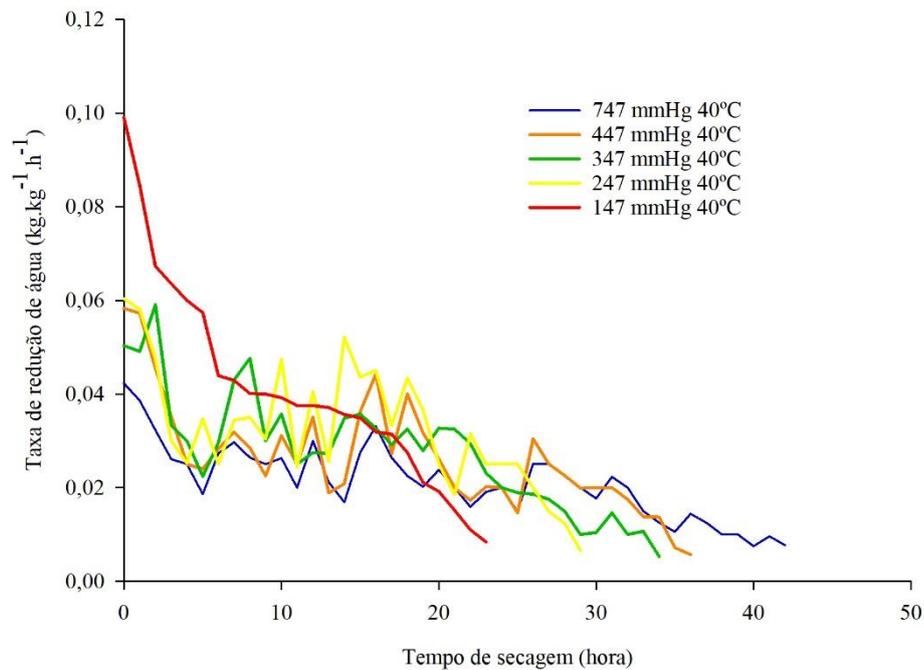
Verifica-se, ainda na Tabela 1, que o aumento da temperatura de secagem acarreta em maiores taxas de redução de água para um mesmo teor de água, e essas diferentes taxas nas diferentes temperaturas são maiores no início da secagem e, à proporção que o café em pergaminho fica mais seco, as diferenças diminuem significativamente (Figuras 5 e 6). Já o efeito da pressão absoluta, para a mesma temperatura, é mais evidente para as menores pressões.

Figura 5 - Taxa de redução de água em função do tempo de secagem dos grãos de café despulpados para a temperatura de 35°C.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 6 - Taxa de redução de água em função do tempo de secagem dos grãos de café despulpados para a temperatura de 40°C.



Fonte: Do autor (2019).

A análise de variância (Apêndice A) indicou que houve efeito significativo da interação entre temperatura do ar de secagem e a pressão absoluta, como houve também para os efeitos isolados da temperatura e da pressão.

Na Tabela 2 encontram-se os resultados do desdobramento do efeito do tratamento de secagem para cada temperatura e pressão absoluta sobre o tempo de secagem do café despulpado.

Tabela 2 - Valores médios de tempo de secagem (horas), até o café atingir  $0,125 \pm 0,005$  kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (bs) no grão, para o café despulpado, em função da pressão absoluta e da temperatura do ar de secagem.

Temperatura (°C)	Pressão (mmHg)				
	147	247	347	447	747
35±1	27,3aA	35,5aB	44,5aC	46aD	55,3aE
40±1	23,3bA	29,5bB	35,8bC	36,5bC	42,8bD

Médias seguidas de letras distintas, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

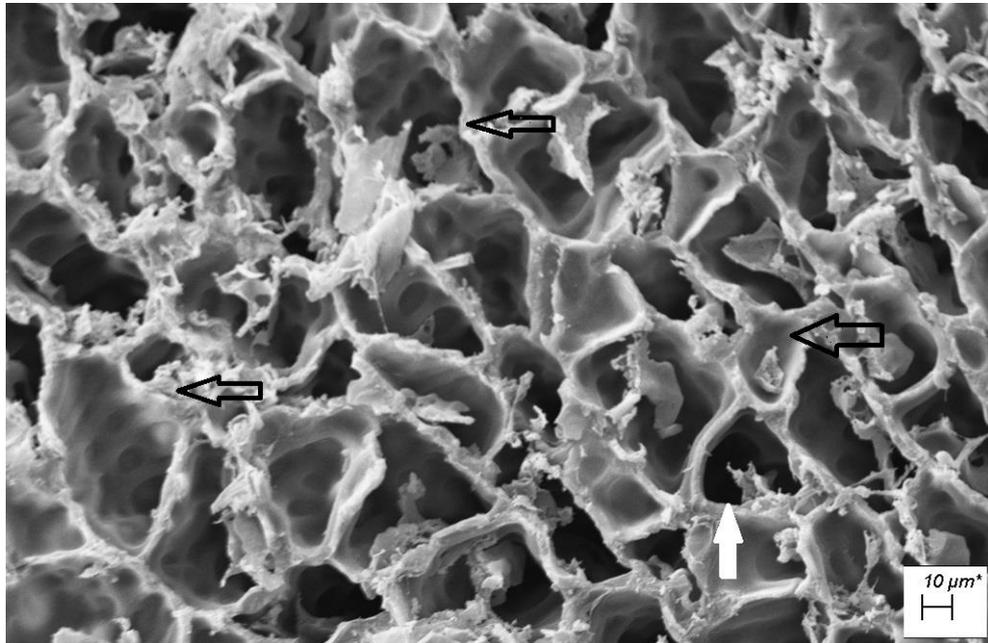
Pode-se confirmar, pelos dados da Tabela 2, que houve diferenças significativas entre as temperaturas e pressões absolutas de secagem utilizados, e que os maiores tempos de secagem foram para as temperaturas de 35°C, quando se compara uma mesma pressão.

Com relação às pressões absolutas utilizadas, nota-se que, para as duas temperaturas do ar de secagem, a pressão de 147 mmHg apresentou os menores tempos de secagem. Já para as pressões de 347 e 447 mmHg, para a temperatura de 40°C, não foram encontradas diferenças significativas. Esse resultado, pode indicar que a relação da temperatura de secagem com a pressão absoluta utilizada já não existe uma interferência significativa nos tratamentos.

### 3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

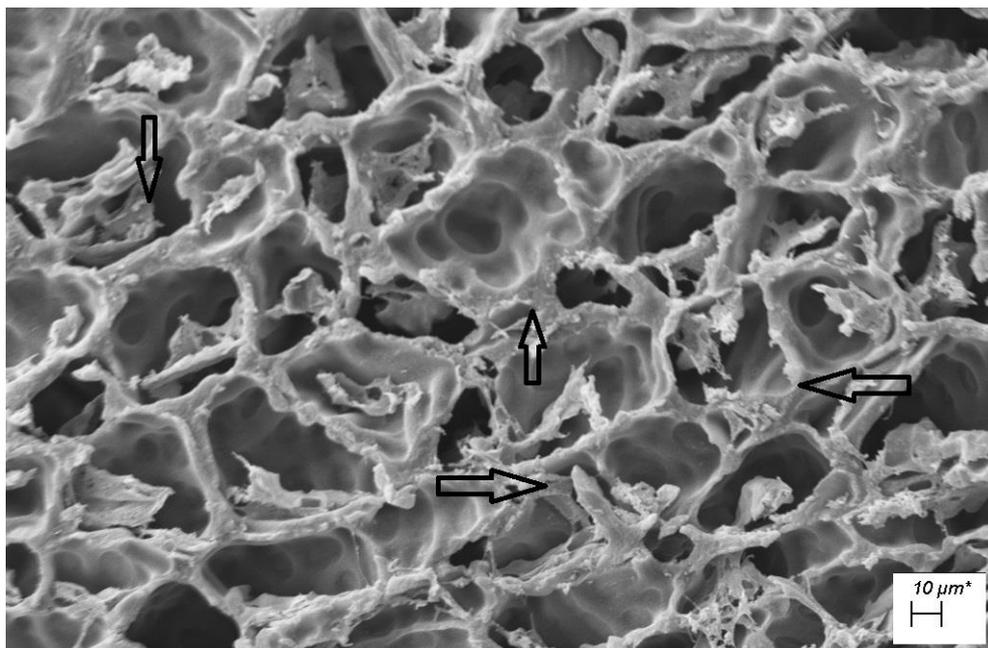
Os resultados das alterações nas estruturas das membranas celulares do endosperma do café despulpado, provocadas pelos efeitos de secagem e da pressão absoluta, são observados nas Figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12 por meio das análises de MEV. A escolha dos tratamentos submetidos a MEV foi feita de acordo com os parâmetros de secagem (tempo e pressão absoluta).

Figura 7 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 35°C e pressão absoluta de 147 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular.



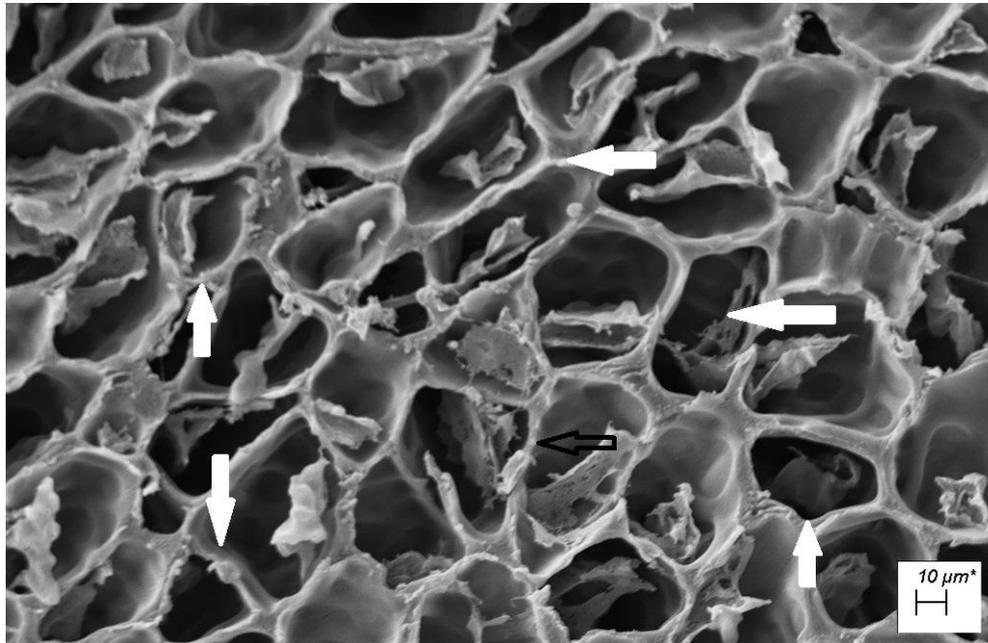
Fonte: Do autor (2019).

Figura 8 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 40°C e pressão absoluta de 147 mmHg. Setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular.



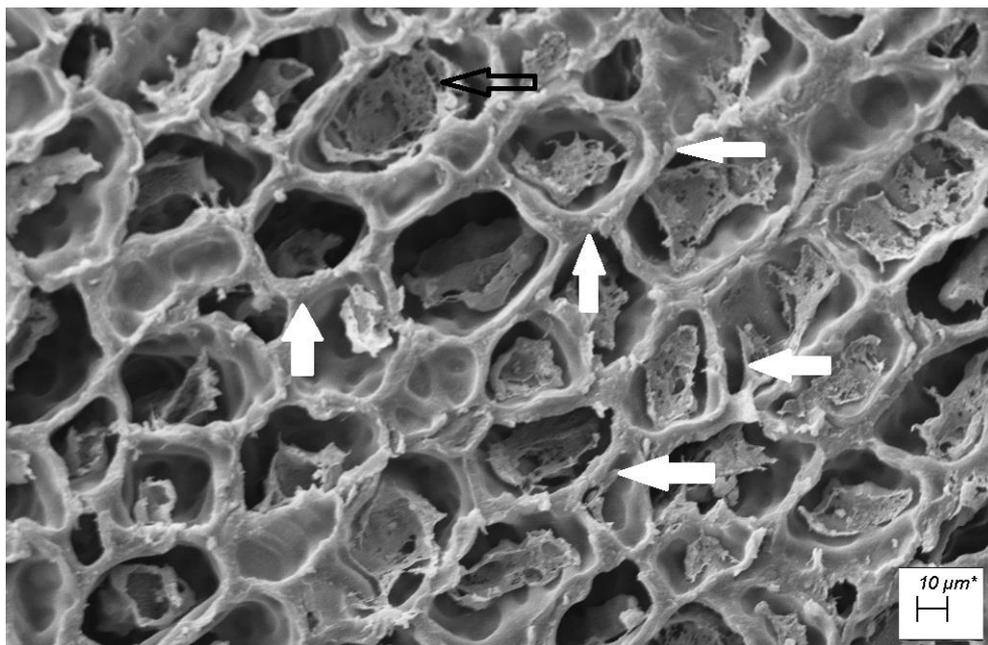
Fonte: Do autor (2019).

Figura 9 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 35°C e pressão absoluta de 747 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 10 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 40°C e pressão absoluta de 747 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular.



Fonte: Do autor (2019).

Nas Figuras 7 e 8, referente aos tratamentos com pressão de 147 mmHg e temperaturas de 35 e 40°C, respectivamente, observa-se os maiores danos nas paredes celulares, resultando em rupturas e maior desorganização celular. Nota-se ainda que, a maioria dos espaços intercelulares, encontram-se preenchidos, indicando maior extravasamento do líquido intercelular (protoplasma). Nas Figuras 9 e 10, referente aos tratamentos com pressão de 747mmHg (atmosférica) e temperaturas de 35 e 40°C, respectivamente, verifica-se um melhor arranjo das paredes celulares e conseqüentemente menores danos estruturais. Verifica-se, também, que o lúmen, espaço entre a membrana plasmática e a parede celular, bem como os espaços intercelulares, apresentam-se vazios somente para os tratamentos de pressão atmosférica. Observa-se contrações no conteúdo das células das duas pressões estudadas, com sinais de rupturas e possível extravasamento celular de gotas de óleos.

Por conseqüência, os maiores danos estruturais ocorridos nos tratamentos, submetidos a menor pressão, podem ser explicados pela maior taxa de redução de água na qual foram submetidos e conseqüentemente pela baixa pressão utilizada. De acordo com Saath et al. (2010), a retirada da água durante a secagem, induz a parede celular à contração podendo causar sua desestruturação, além de reduzir o volume celular, provocando uma aglomeração dos componentes citoplasmáticos, tornando o conteúdo da célula incrivelmente viscoso. Vale ressaltar que dentre os tratamentos expostos a temperatura de 40°C, o que obteve menor tempo de secagem foi aquele submetido a pressão de 147 mmHg.

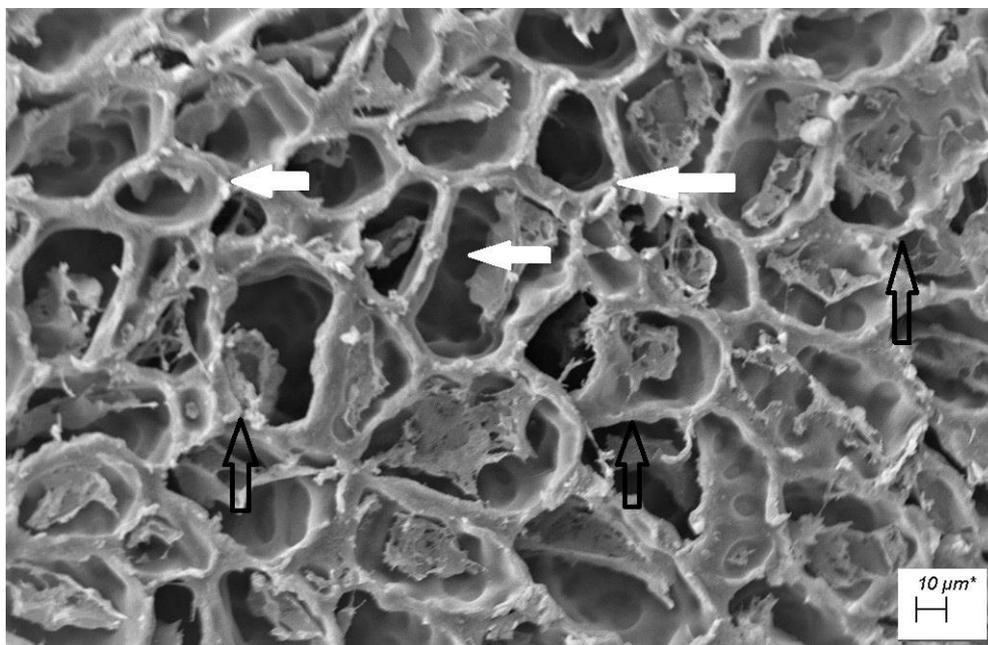
Analisando-se a Figura 8, referente a maior temperatura e menor pressão (40°C e 147 mmHg), observa-se que o conteúdo interno das células apresenta-se bem contraído, espaços intercelulares preenchidos e com pouco material celular, isto é, que toda a parte do citoplasma foi desidratada e apresentou pontos salientes em forma de gota sobre a contração da parede celular. Isso significa que, com a lesão nas membranas, as glândulas de óleos presentes no perímetro interno da membrana plasmática romperam, extravasando seu conteúdo, concentrando-se em forma globular sobre o material celular, conforme constatado por Marques (2006). Sendo assim, este foi o tratamento que mais causou danos nas estruturas celulares do café despolpado para o presente estudo.

Em contraponto, examinando a Figura 9, referente a menor temperatura e maior pressão (35°C e 747 mmHg (atmosférica)), constata-se que o conteúdo interno das células apresentou-se contraído, mas sem sinais evidentes de extravasamentos celulares e rupturas, e que o espaço entre a membrana plasmática e a parede celular, o lúmen, assim como os espaços intercelulares apresentaram-se vazios. Verifica-se com isso, que o processo de secagem transcorreu em condições seguras preservando a integridade das células de acordo com os resultados de

Marques (2006) e Oliveira et al. (2013). Pode-se afirmar que, este foi o tratamento que menos causou danos nas estruturas celulares do café despolpado.

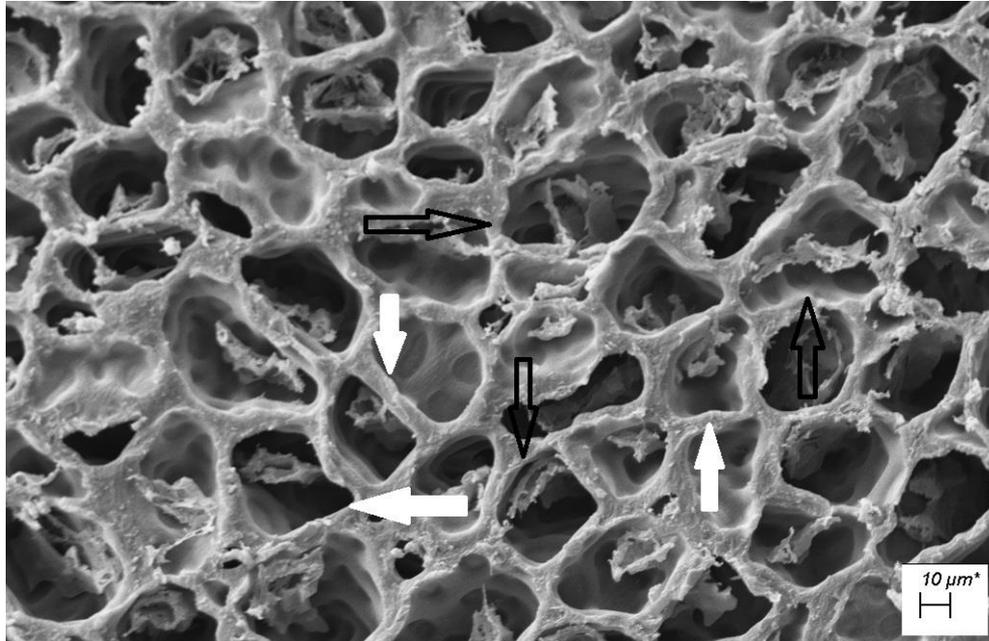
Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os resultados das análises de microscopia eletrônica de varredura para os cafés despolpados, secados com pressão de 347 mmHg e temperaturas de 35 e 40°C, respectivamente.

Figura 11 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despolpado submetido a temperatura de 35°C e pressão absoluta de 347 mmHg. Setas na cor branca preenchidas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 12 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café despulpado submetido a temperatura de 40°C e pressão absoluta de 347 mmHg. Setas na cor branca preenchedas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas na cor preta sem preenchimento representam desestruturação da parede celular.



Fonte: Do autor (2019).

Nas Figuras 11 e 12, observa-se alguns danos nas paredes celulares, resultando em rupturas e pouca desorganização celular. Nota-se ainda que, a maioria dos espaços intercelulares não se encontra preenchidos, indicando menor extravasamento do líquido intercelular (protoplasma). Além disso, constata-se um adequado arranjo das paredes celulares e conseqüentemente menores danos estruturais comparados ao tratamento com pressão absoluta de 147 mmHg (Figura 7 e 8). Observa-se também, contrações no conteúdo das células, com sinais evidentes de rupturas e extravasamento celular de gotas de óleos. Rocha (2018), estudando o efeito da secagem a vácuo a 447 mmHg em cafés descascados, constatou que não houveram danos fisiológicos para os cafés analisados, mantendo assim, a qualidade do produto.

## **4 CONCLUSÃO**

Nas condições em que foi desenvolvido o presente trabalho, conclui-se que:

A diminuição da pressão para as duas temperaturas estudadas (35 e 40°C) aumenta a taxa de redução de água, conseqüentemente, reduz o tempo de secagem do café.

O tempo gasto para a secagem do café em pergaminho, utilizando as pressões de 347 e 447 mmHg, para a temperatura de 40°C, são estatisticamente iguais. Todavia, para as demais situações, os tempos de secagem, dentro de uma mesma pressão, são diferentes estatisticamente.

Os estudos ultraestruturais de microscopias eletrônicas de varredura mostraram maiores danos na menor pressão absoluta (147 mmHg) para a temperatura de 40°C. A pressão local (747 mmHg) proporcionou uma maior integridade das membranas e vesículas celulares, sem sinais evidentes de ruptura, havendo pequena contração celular e espaços intercelulares vazios.

Para a pressão absoluta de 347 mmHg, nas duas temperaturas em estudo, nota-se poucos danos nas membranas celulares, proporcionando assim, uma condição adequada para a secagem de cafés despulpados, reduzindo em até 19% no tempo de secagem em relação à pressão local (atmosférica).

## **5 AGRADECIMENTOS**

CAPES, FAPEMIG e CNPq.

## REFERÊNCIAS

- AGHBASHLO, M. et al. A review on exergy analysis of drying processes and systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 22, p. 1-22, 2013.
- ALVES, G. E. et al. Physiological and sensorial quality of Arabica coffee subjected to different temperatures and drying airflows. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 39, n. 2, p. 225-233, 2017.
- BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T.; ISQUIERDO, E. P. Coffee drying. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Handbook of coffee post-harvest technology**. Georgia: Norcross, 2014. p. 97-118.
- BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 205-240.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009. 399 p.
- CORRÊA, P. C. et al. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in diferente processing levels. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 45, p. 2016-2022, 2010b.
- DONG, W. et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. **Food Chemistry**, London, v. 234, n. 6, p. 121-130, 2017.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.
- HORECKI, A. T. et al. Comparative drying of cornelian cherries: kinetics modeling and physico-chemical properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, Westport, v. 42, n. 3, p. e13562, Mar. 2018.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Green coffee: determination of loss in mass at 105°C: ISO 6673**. Geneva, 2003. 17 p.
- ISQUIERDO, E. P. et al. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, 2013.
- KAYACAN, S.; SAGDIC, O.; DOYMAZ, I. Effects of hot-air and vacuum drying on drying kinetics, bioactive compounds and color of bee pollen. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 1, n. 2, p. 1-10, 2018.
- MARQUES, E. R. **Alterações químicas, sensoriais e microscópicas do café cereja descascado em função da taxa de remoção de água**. 2006. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- OLIVEIRA, P. D. de et al. Aspectos fisiológicos de grãos de café, processados e secados de diferentes métodos, associados à qualidade sensorial. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 211-220, 2013.

OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem.** 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ORIKASA, T. et al. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 125, n. 1, p. 51-58, 2014.

RIBEIRO, D. M. et al. Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 28, n. 7, p. 94-107, 2003.

ROCHA, H. A. **Secagem a vácuo de cafés descascados: cinética de secagem e efeitos fisiológicos.** 2018. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

SAATH, R. et al. Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, jan./fev. 2010.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Londrina, v. 34, n. 3, p. 231-238, 2012b.

TAVEIRA, J. H. S. **Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem.** 2009. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ZHANG, L. et al. Effects of drying methods on the nutritional aspects, flavor, and processing properties of Chinese chestnuts. **Journal Food Science Technology**, India v. 55, n. 9, p. 3391-3398, Sep. 2018.

**ARTIGO 2 – MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM A VÁCUO DE CAFÉS  
DESPOLPADOS**

## RESUMO

A secagem a vácuo baseia-se na condução da secagem em um ambiente com pressão inferior à atmosférica, na qual se utilizam temperaturas abaixo daquelas que seriam necessárias sob pressão atmosférica para se atingir o mesmo efeito. Isto posto, objetivou-se, com o presente trabalho, apresentar um novo modelo de secagem para o processo à vácuo. Para caracterizar o processo de secagem a vácuo de cafés despulpados foram ajustados 14 modelos matemáticos para pressão local (atmosférica) em duas temperaturas diferentes ( $35\pm 1$  e  $40\pm 1$ °C). Utilizou-se o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA) para o ajuste dos modelos matemáticos e através dos parâmetros desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrou o melhor modelo, Midilli. Utilizando a equação de Arrhenius, o modelo Midilli foi modificado para descrever a cinética de secagem a vácuo. Os resultados obtidos mostram um ajuste satisfatório, com  $R^2$  superiores a 99,19%, P menores que 10% e SE próximo a zero. Dessa forma, conclui-se que o modelo modificado atendeu aos parâmetros requisitados mostrando-se um modelo apto para a secagem a vácuo de cafés despulpados.

**Palavras-chaves:** Secagem a vácuo. Cafés despulpados. Modelos matemáticos. Equação de Arrhenius. Midilli.

## MODELING OF THE VACUUM DRYING PROCESS OF PULPED COFFEE

### ABSTRACT

Vacuum drying is based on conducting drying in a lower atmospheric pressure environment where temperatures below those required under atmospheric pressure are used to achieve the same effect. Thus, the aim of this study was to present a new drying model for the vacuum process. To characterize the vacuum drying process of pulped coffee, 14 mathematical models were adjusted for local pressure (atmospheric) at two different temperatures ( $35\pm 1$  and  $40\pm 1$ °C). The software STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA) was used to adjust the mathematical models and through the parameters standard deviation of the estimate (SE), relative mean error (P) and coefficient of determination ( $R^2$ ) found the best model. Midilli. Using the Arrhenius equation, the Midilli model was modified to describe vacuum drying kinetics. The results show a satisfactory fit, with  $R^2$  greater than 99.19%, P less than 10% and SE near zero. Thus, it is concluded that the modified model met the required parameters showing a model suitable for vacuum drying pulped coffee.

**Keywords:** Vacuum drying. Pulped coffees. Mathematical models. Arrhenius equation. Midilli

## 1 INTRODUÇÃO

A produtividade progressiva da cafeicultura brasileira é favorecida pelos avanços tecnológicos respectivos ao plantio, cultivo, tratamento fitossanitário, poda e adubação, entre outros processos, ocorridos nos últimos anos. Com isso, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com estimativa de produção, para a safra 2019, de 51 milhões de sacas do produto beneficiado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2019). Mesmo sendo líder no mercado mundial e com tecnologias aptas a oferecer elevada produtividade e alta velocidade de colheita, se faz necessário uma nova tecnologia ou metodologia de secagem, na qual possibilite reduzir o tempo de secagem sem modificar a qualidade da bebida.

Por possuir certas particularidades, o café recém-colhido distingue-se dos demais grãos cultivados em larga escala, como, alto teor de água, aproximadamente 60% (bu) e desuniformidade em relação à maturação (RESENDE et al., 2009). Portanto, para evitar as fermentações indesejáveis que podem prejudicar a qualidade do produto, a etapa de secagem é de fundamental importância no processo de pós-colheita.

Atualmente, a elevação da taxa de redução de água somente é possibilitada com o aumento da temperatura ou do fluxo de ar, de acordo com a tecnologia acessível para a secagem do café. Entretanto, temperaturas superiores à 40 °C na massa de café provocam danos térmicos que reduzem a qualidade do café (TAVEIRA, 2009; OLIVEIRA, 2010; ISQUIERDO et al., 2013).

A secagem a vácuo é um método em que o produto úmido é seco sob pressão sub-atmosférica (ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005) e uma de suas características peculiares em comparação com a temperatura atmosférica convencional é que, a oxidação do produto é evitada, visto que, o produto não tem contato com o ar durante o processo de secagem. Conseqüentemente, os atributos sensoriais e nutritivos dos alimentos são efetivamente mantidos, devido ao tempo comparativamente curto e a baixa temperatura de secagem (WU et al., 2007).

Para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos é necessário o uso da simulação matemática do processo de secagem (Resende et al., 2010).

Na literatura são apresentados vários métodos (teóricos, semiempíricos e empíricos) para se observar a secagem de produtos higroscópicos (DI SCALA; CRAPISTE, 2008;

HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; BURMESTER; EGGERS, 2010; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011; NILNONT et al., 2012; ISQUIERDO et al., 2013).

Em grande parte dos trabalhos, inclusive neste, os modelos empíricos e semiempíricos, graças à simplicidade de uso, dispõem como as melhores opções para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas, mesmo que sua validade esteja restrita às faixas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Alguns pesquisadores ajustaram modelos para melhor caracterizar os processos de secagem. Henderson e Pabis (1961) constataram que a constante de secagem poderia ser expressa por uma equação do tipo Arrhenius, verificaram a relação com dados experimentais em trigo e milho. Bala (1983) observou que a constante de secagem do malte foi altamente correlacionada à temperatura do ar na faixa de 30,3 a 90,2 °C e também pode ser melhor representada por uma equação do tipo Arrhenius.

Avaliando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas, este trabalho foi realizado com os objetivos de ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais em função da temperatura do ar de secagem de café (*Coffea arabica* L., cv. Topázio MG 1190) em estufa a vácuo, e apresentar um novo modelo de secagem para o processo à vácuo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Procedimento experimental

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas (LPPA) do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foi utilizado o café cereja (*Coffea arabica* L. cv. Topázio MG 1190) colhido manualmente em uma lavoura no campo experimental da Universidade Federal de Lavras, em Lavras – MG. Os frutos foram colhidos no estádio de maturação cereja. Após a colheita, os frutos foram separados, em água, por diferença de densidade, removendo-se os de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados). Após a separação hidráulica, uma nova seleção manual foi realizada para garantir que as amostras sejam constituídas somente por frutos maduros. Os frutos maduros selecionados foram descascados mecanicamente (processamento via úmida). O despulpamento foi efetuado pela imersão em água em recipientes plásticos (baldes de 25 litros) por 24 horas. Após o processamento, o café em pergaminho foi, então, levado para a estufa de vácuo onde os cafés em pergaminho foram secos até a faixa de teor de água de  $0,125 \pm 0,005$  kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (bs).

### 2.2 Sistema de secagem

Os experimentos de secagem foram realizados em uma estufa à vácuo (modelo SL-104/40, da marca SOLAB, de Piracicaba/SP - Brasil), com capacidade de 40 litros e apresentada na Figura 1. Foram avaliadas duas temperaturas de secagem,  $35 \pm 1$  e  $40 \pm 1$  °C e cinco diferentes pressões absolutas: 147, 247, 347, 447 e 747 mmHg (pressão local). Dentro da estufa o café em pergaminho foi distribuído em quatro sacos de malha de poliéster contendo 100 gramas de grãos em cada um. Cada saco foi considerado uma repetição.

A temperatura das amostras de café foi medida com o auxílio de termômetros de mercúrio inseridos no centro da massa. Em tempos pré-determinados, as amostras de café tiveram suas massas mensuradas utilizando uma balança analítica com resolução de 0,01g. A posição dos sacos foi rotacionada em cada abertura da estufa para pesagem.

A umidade relativa do ar de secagem dentro da estufa foi medida com o auxílio de um termohigrômetro digital portátil (modelo Datalogger, da marca Zetta Tronnic, de São Paulo/SP - Brasil), com sensor inserido no interior da estufa. Partículas de dióxido de silício em massa igual a massa total de café em cada experimento, foi colocado no interior da estufa com a

intenção de que a umidade retirada do café durante a secagem não saturasse a atmosfera interna da estufa. Estas partículas eram substituídas a cada 10 horas de secagem, considerando sempre igual a massa com relação a massa total das amostras em cada instante de secagem.

Figura 13 - Estufa à vácuo do modelo SL-104/40.



Fonte: Do autor (2019).

### 2.3 Teor de água

Após a colheita e o processamento, amostras do café em pergaminho foram submetidas à determinação do teor de água inicial, pelo método padrão de estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  durante 24 horas, como estabelecido nas Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009). Já o teor de água do café seco beneficiado e do endosperma foram determinados pelo método padrão ISO 6673 (International Organization For Standardization - ISO, 2003).

O teor de água das amostras a qualquer tempo foi calculado por meio da Equação 1 descrita abaixo:

$$U_t = \frac{m_{ai} - (m_{ti} - m_{tt})}{m_{ms}} \quad (1)$$

Onde:

$U_t$ : Teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (b.s.));

$m_{ai}$ : Massa de água inicial (kg);

$m_{ti}$ : Massa total inicial (kg);

$m_{tt}$ : Massa total no tempo t (kg);

$m_{ms}$ : Massa de matéria seca (kg).

## 2.4 Cinética de secagem e ajuste dos modelos

A evolução dos processos de secagem com o tempo pode ser definida com base na razão de umidade (RU) (Equação 2). Valores de razão de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados aos modelos utilizados para descrever a cinética de secagem dos grãos de café apresentados na Tabela 1.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (2)$$

Onde:

RU: Razão de umidade (adimensional);

U: Teor de água do produto no tempo t (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.)).

O teor de água de equilíbrio higroscópico será calculado pela Equação 3, para o café despulpado (AFONSO JUNIOR, 2001):

$$U_e = (2,9636 + 0,0530 * T - 10,7837 * UR^{4,5136})^{-1,6503} \quad (3)$$

Onde:

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

T: temperatura do ar de secagem (°C);

UR: umidade relativa do ar de secagem (decimal).

Tabela 1 - Modelos matemáticos usados para prever o fenômeno de secagem.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Aproximação da Difusão <sup>1</sup>	$RU = (a \exp(-k t)) + (1-a) \exp(-k b t)$	(4)
Dois Termos <sup>2</sup>	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(5)
Exponencial de dois termos <sup>3</sup>	$RU = (a \exp(-k t)) + (1-a) \exp(-k a t)$	(6)
Henderson e Pabis <sup>4</sup>	$RU = a \exp(-k t)$	(7)
Henderson e Pabis Modificado <sup>5</sup>	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(8)
Lewis <sup>6</sup>	$RU = \exp(-k t)$	(9)
Midilli <sup>7</sup>	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	(10)
Midilli Modificado <sup>8</sup>	$RU = \exp(-k t^n) + a t$	(11)
Newton <sup>9</sup>	$RU = \exp(-k t)$	(12)
Page <sup>10</sup>	$RU = \exp(-k t^n)$	(13)
Thompson <sup>11</sup>	$RU = \exp(-a(((a^2) + (4 b t))^{0,5}))(2 b)^{-1}$	(14)
Valcam <sup>12</sup>	$RU = a + b t + c t^{1,5} + d t^2$	(15)
Verma <sup>13</sup>	$RU = -a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-k_1 t)$	(16)
Wang & Sing <sup>14</sup>	$RU = 1 + a t + b t^2$	(17)

<sup>1</sup>Kassem (1998); <sup>2</sup>Henderson (1974); <sup>3</sup>Sharaf-Eldee, Blaisdell e Hamdy (1980); <sup>4</sup>Henderson e Pabis (1961); <sup>5</sup>Karathanos (1999); <sup>6</sup>Lewis (1921); <sup>7</sup>Midilli, Kucuk e Yapar (2002); <sup>8</sup>Ghazanfari et al. (2006); <sup>9</sup>Callaghan, Menzies e Bailey (1971); <sup>10</sup>Page (1949); <sup>11</sup>Thompson; Peartt; Foster (1968); <sup>12</sup>Siqueira, Resende e Chaves (2013); <sup>13</sup>Verma et al. (1985); <sup>14</sup>Wang e Singh (1978).

em que:

RU: razão de umidade;

t: tempo de secagem, h;

k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>: constantes de secagem; e

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

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não-linear pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo baseou-se nos seguintes parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). O desvio padrão da estimativa e o erro médio relativo foram calculados, respectivamente, pelas Equações 18 e 19.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (18)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{n=1}^n \left( \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (19)$$

em que:

SE: desvio padrão da estimativa (decimal);

Y: valor observado experimentalmente;

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

GLR: graus de liberdade do modelo;

P: erro médio relativo (%);

n: número de dados observados.

O coeficiente de difusão efetivo para as condições de secagem utilizadas neste trabalho foi calculado ajustando-se o modelo baseado na teoria de difusão líquida (Equação 20) aos dados observados, por meio de regressão não linear, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica, desconsiderando a contração

volumétrica dos frutos e considerando a condição de contorno do teor de água conhecido na superfície do produto (BROOKER et al., 1992).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ - \frac{n^2 \pi^2 D_{\text{eff}}}{R^2} t \right] \quad (20)$$

em que:

$D_{\text{eff}}$ : coeficiente de difusão efetivo ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

R: raio equivalente dos frutos de café (m);

n: número de termos;

t: tempo (s).

A solução analítica dessa equação apresenta-se na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n), no truncamento, poderá determinar a precisão dos resultados obtidos. Neste experimento, realizou-se uma aproximação de oito termos dessa série que, segundo Afonso Júnior e Corrêa (1999), é adequada para fornecer uma estimativa satisfatória do coeficiente de difusão efetivo.

O raio equivalente dos grãos de café foi definido como o raio de uma esfera com volume equivalente ao volume do fruto. Para o cálculo do seu volume, tomou-se uma amostra de 25 grãos de cada repetição, de todos tratamentos, dos quais foram tomadas medidas de comprimento, largura e espessura, com o uso de um paquímetro digital com resolução de 0,01mm, sendo o volume dos frutos de café (V) calculado pela Equação 21 (ISQUIERDO, 2011).

$$V = \frac{4}{3} \pi a b c \quad (21)$$

em que:

V: volume dos grãos ( $\text{m}^3$ );

a: comprimento (m);

b: largura (m);

c: espessura (m).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Ajuste dos modelos matemáticos

Na Tabela 2, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os quatorze modelos empregados para a descrição da cinética de secagem dos grãos de cafés despulpados (Tabela 1), com teor de água inicial médio de  $1,09 \pm 0,05$  b.s., quando submetidos às condições de temperatura de 35 e 40°C do ar de secagem e pressão local (atmosférica) empregadas neste experimento. Os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P) são apresentados. Baseia-se na análise conjunta desses parâmetros apresentados a escolha de um modelo para representar o fenômeno da secagem de um produto agrícola, dos quais, a análise de um único parâmetro não estabelece uma boa ferramenta para a seleção de modelos não lineares.

Tabela 2 - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), para os modelos analisados, na secagem do café despulpado, nas temperaturas de 35 e 40°C e pressão local.

Modelos	35°C			40°C		
	$R^2$ (%)	SE	P (%)	$R^2$ (%)	SE	P (%)
Aproximação da Difusão	98,7	0,16	13,30	99,1	0,13	12,80
Dois Termos	98,1	0,16	19,56	97,5	0,17	22,37
Exponencial de Dois Termos	98,7	0,18	3,15	96,9	0,24	7,96
Henderson e Pabis	98,1	0,27	19,52	97,5	0,30	22,34
Henderson e Pabis Modificado	98,1	0,12	19,52	97,5	0,13	22,34
Lewis	98,1	0,27	19,77	96,9	0,33	25,24
Midilli	99,9	0,04	3,38	99,9	0,03	4,14
Midilli Modificado	99,9	0,05	3,60	99,9	0,04	4,46
Newton	98,1	0,27	19,77	96,9	0,33	25,24
Page	98,5	0,24	14,22	99,1	0,18	11,74
Thompson	99,3	0,16	4,13	99,7	0,10	6,58
Valcam	99,8	0,04	2,63	99,9	0,03	3,31
Verma	99,8	0,06	3,24	97,5	0,21	22,34
Wang & Sing	99,1	0,19	6,65	99,9	0,07	3,05

Fonte: Do autor (2019).

Segundo Kashaninejad et al. (2007) e Madamba et al. (1996), coeficientes de determinação ( $R^2$ ) maiores que 95% demonstram uma representação satisfatória do processo de secagem. Todavia, os mesmos autores reiteram que o coeficiente de determinação, à parte, não estabelece um bom parâmetro para a seleção de modelos não lineares. Já Draper e Smith

(1998) confirmam que a capacidade de um modelo descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa (SE). Portanto, quanto menor o valor do SE, melhor o ajuste do modelo aos dados experimentais de razão de umidade (SIQUEIRA et al., 2013). Para o erro médio relativo (P) que indica o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (KASHANINEJAD et al. 2007) são recomendados valores inferiores a 10%, para a recomendação do modelo (MOHAPATRA; RAO, 2005).

Analisando a temperatura de 35°C da secagem dos grãos de café (Tabela 2), verifica-se que todos os modelos apresentaram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 98,1% o que, de acordo Kashaninejad et al. (2007) e Madamba et al. (1996), são valores considerados admissíveis para descrever o fenômeno da secagem. No momento em que se considera o parâmetro ( $P < 10\%$ ) para um ajuste aceitável, os modelos de Midilli, Wang & Sing, Valcam, Exponencial De Dois Termos, Thompson, Verma e Midilli Modificado atingiram o requisito desejado, com erro médio relativo menor que 10%. Dentre os modelos que atingiram os três requisitos, o de Midilli e Midilli Modificado foram os que apresentaram os maiores valores de  $R^2$  ( $R^2 \geq 99,9\%$ ) para ambos, e menores valores de P (3,38% e 3,60%) e SE (0,04 e 0,05), respectivamente.

Ao analisar a temperatura de 40°C da secagem dos grãos de café (Tabela 2), verifica-se que todos os modelos apresentaram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 96,9%. Quando se considera o parâmetro ( $P < 10\%$ ) para um ajuste aceitável, os modelos de Midilli, Wang & Sing, Valcam, Exponencial De Dois Termos, Thompson e Midilli Modificado atingiram o requisito desejado, com erro médio relativo menor que 10%. Dentre os modelos que atingiram os três requisitos, o de Midilli, Wang & Sing, Valcam e Midilli Modificado foram os que apresentaram os maiores valores de  $R^2$ , valores maiores que 99,9% para todos os quatro modelos, e menores valores de P (4,14%; 3,05%; 3,31% e 4,46%, respectivamente) e SE (0,03; 0,07; 0,03 e 0,04, respectivamente).

Entre os modelos estudados neste trabalho para descrever o processo de secagem de cafés despulpados, os modelos de Midilli e Midilli Modificado foram os que melhor se ajustaram, para as duas temperaturas de secagem e pressão local (atmosférica).

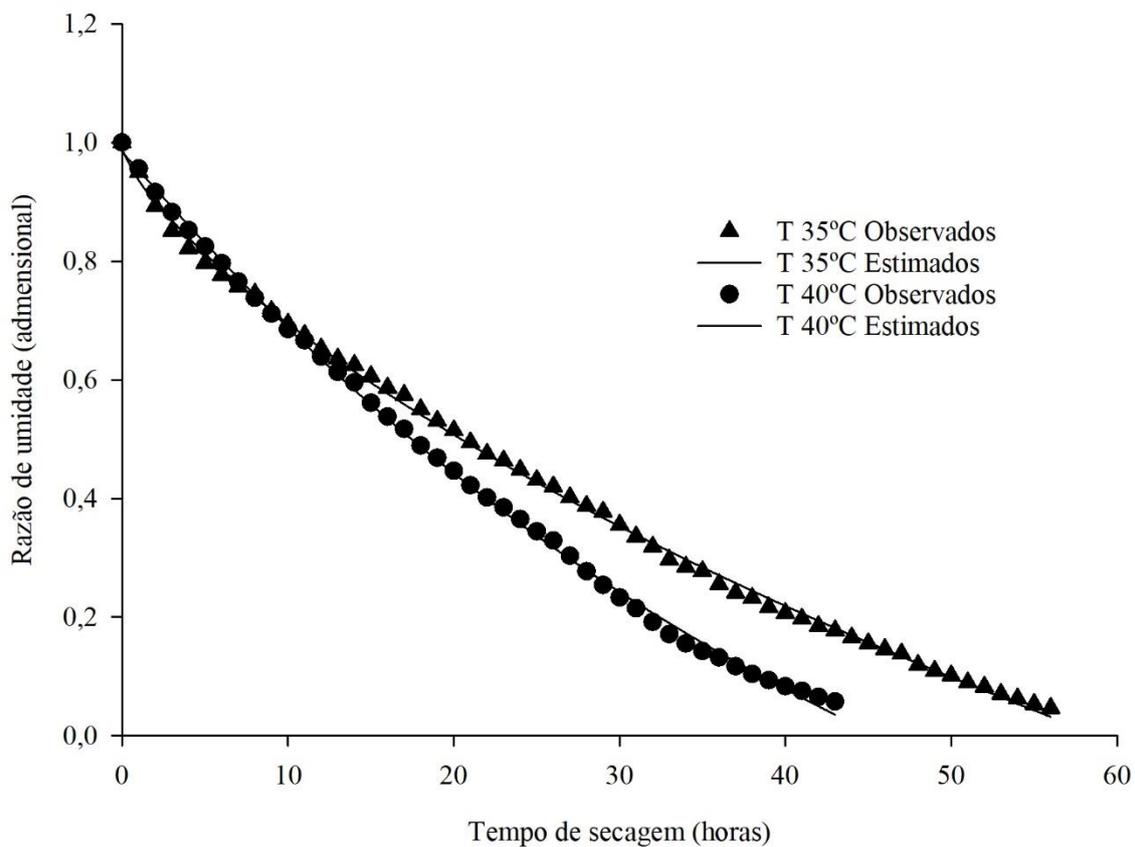
Corrêa et al. (2010), alcançaram um ajuste satisfatório do modelo de Midilli Modificado para descrever a secagem de frutos de café. Da mesma forma, Isquierdo et al. (2013), avaliando o efeito de diferentes temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho na cinética de secagem do café natural, também indicaram o modelo de Midilli Modificado como sendo o que melhor representa o processo. Goneli et al. (2009) e Alves (2013), estudaram a cinética de secagem do

café descascado e natural, respectivamente, e afirmam que o modelo de Midilli foi o mais adequado para a representação do processo.

Em estudos com outros produtos, o modelo de Midilli, do mesmo modo, foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem: tal como o feijão-vermelho (CORRÊA et al. 2007), a carqueja (RADÜNZ et al., 2011), folhas de fruta-de-lobo (PRATES et al., 2012), folhas de manjeriço (REIS et al., 2012), grãos de pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012) e folhas de aroeira (GONELLI et al., 2014).

A Figura 2 mostra os comportamentos da razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli, para o café despulpado nas temperaturas de 35 e 40°C para a pressão local (atmosférica) durante a secagem. Observa-se a elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os valores estimados pelo modelo, o que confirma o ajuste satisfatório desse modelo para descrever a cinética para cada condição estudada.

Figura 14 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café despulpado nas duas temperaturas estudadas e pressão local (atmosférica), em função do tempo.



Fonte: Do autor (2019).

Em concordância com outros autores (JOHANN et al., 2016), que pesquisaram cinética de secagem, isso comprova que o modelo é aceito para descrever matematicamente a cinética de secagem do produto estudado. Esse resultado coincide com outros estudos já realizados. Foroughi-Dahr et al. (2015) secando arroz, indicaram o modelo de Midilli para descrever o processo. Silva et al. (2016), igualmente, observaram um melhor ajuste utilizando esse modelo na secagem de frutos de Pimenta Cabacinha. Costa et al. (2016), da mesma forma, indicaram esse modelo para a secagem da casca de jabuticaba.

Resende, Ferreira e Almeida (2010) recomendam o modelo de Midilli para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki por apresentar um dos melhores ajustes na secagem e, ainda, apresentar operações matemáticas simples e possuir menor número de coeficientes. O modelo matemático Midilli é matematicamente um dos mais práticos, apresentando menor número de coeficientes, tornando mais simples sua aplicação e uso em simulações de secagem (KASHANINEJAD et al., 2007).

Na Tabela 3, são mostrados os coeficientes do modelo matemático escolhido, com base nos critérios de seleção estatísticos, na modelagem das curvas de secagem do café despulpado, nas temperaturas de secagem de 35 e 40°C. Verifica-se que a magnitude da constante de secagem “k”, que representa o efeito das condições externas de secagem (GONELI et al., 2009), tem um comportamento de se aumentar com a elevação da temperatura de secagem, o que pode ser confirmado nas condições estudadas, pois os dados expressos são numericamente negativos. Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996) e Babalis e Belessiotis (2004), a constante de secagem “k” pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem para o período decrescente, mostrando que a taxa de redução de água se eleva com o aumento da temperatura.

Tabela 3 - Coeficientes do modelo de Midilli escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café despulpado, para as duas temperaturas estudadas.

Temperatura (°C)	Coeficiente			
	a	k	n	b
35	0,987803	0,046977	0,758788	-0,005946
40	0,984036	0,025592	1,039446	-0,005562

Fonte: Do autor (2019).

k: constantes de secagem; a, b e n: coeficientes dos modelos.

Com a escolha do modelo de Midilli como o mais adequado para o estudo da secagem de cafés despulpados nas temperaturas de 35 e 40°C para a pressão local (atmosférica), modificou-se o mesmo para se adequar as condições de secagem a vácuo proposto nessa pesquisa. Para a modificação, utilizou-se a equação de Arrhenius (Equação 22). Em um sistema termodinâmico aleatório, no qual, uma ou mais de suas variáveis termodinâmicas modificam seus valores, logo, esse sistema passou por uma mudança de estado ou transformação de estado termodinâmico. Essa equação demonstra-se adequada porque explica a relação quantitativa entre pressão, temperatura, energia de ativação e constante de velocidade. A sua utilização mais aproveitável consiste na determinação da energia de uma reação, advindo de medidas de velocidade a diferentes temperaturas.

$$k = D \exp\left(-\frac{E}{T}\right) \quad (22)$$

em que:

k: constante de taxa ( $s^{-1}$ );

D e E: constantes;

T: temperatura (kelvin).

Uma energia que deve ser ultrapassada ou energia mínima requerida para iniciar uma reação química pode ser definida como energia de ativação (constante E) (OLIVEIRA et al., 2010). A constante de secagem k pode ser relacionada à equação de Arrhenius (Equação 22), embora seja apenas um ajuste de um modelo empírico, em razão de representar de modo aceitável a cinética da secagem (KEEY, 1992; CHEN; MUJUMDAR, 2008). Isto é, por comparar o decréscimo da razão de umidade com o tempo de secagem em diferentes temperaturas, essa constante pode ser relacionada às propriedades termodinâmicas do processo em estudo.

Considerando os valores dos coeficientes da Tabela 3, adicionando a Equação 22 no modelo de Midilli (Equação 10), as novas Equações (23 e 24) para o estudo da secagem a vácuo de cafés despulpados são as seguintes:

$$RU = 0,987803 \exp(-0,046977 * (D \exp(-\frac{E}{T})) * t^{0,758788}) - 0,005946 * t * (D \exp(-\frac{E}{T})) \quad (23)$$

$$RU = 0,984036 \exp(-0,025592 * (D \exp(-\frac{E}{T})) * t^{1,039446}) - 0,005562 * t * (D \exp(-\frac{E}{T})) \quad (24)$$

A partir da determinação desses modelos, foi possível determinar as constantes de pressão utilizadas no estudo. Estes parâmetros foram calculados experimentalmente pela simulação computacional no *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). Foram obtidos os valores para cada parâmetro.

Na Tabela 4, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os dois modelos empregados para a descrição da cinética de secagem dos grãos de cafés despulpados (Equações 23 e 24), com teor de água inicial médio de  $1,09 \pm 0,05$  b.s., quando submetidos às condições de temperatura de 35 e 40°C do ar de secagem e diferentes pressões (147; 247; 347; 447 e 747 mmHg) empregadas neste experimento. Os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P) são apresentados na Tabela 4. Baseia-se na análise conjunta desses parâmetros apresentados a confirmação do ajuste dos modelos modificados, dos quais, a análise de um único parâmetro não estabelece uma boa ferramenta para a seleção de modelos não lineares.

Tabela 4 - Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), para os modelos analisados, na secagem do café despulpado, nas temperaturas de 35 e 40°C e diferentes pressões.

Pressão (mmHg)	35°C			40°C		
	SE	P (%)	$R^2$ (%)	SE	P (%)	$R^2$ (%)
147	0,09	9,10	99,62	0,12	9,88	99,32
247	0,12	7,88	99,48	0,07	4,69	99,80
347	0,13	9,53	99,50	0,10	8,89	99,64
447	0,17	8,59	99,19	0,08	4,46	99,76
747	0,07	3,38	99,88	0,06	4,14	99,90

Fonte: Do autor (2019).

Analisando os valores obtidos, na Tabela 4, nota-se que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos tratamentos apresentaram um  $R^2$  superiores a 99,19%. Quando se considera o parâmetro erro médio relativo ( $P < 10\%$ ), todos os tratamentos atingiram o requisito desejado, com P menores que 10%. E considerando o desvio padrão da estimativa (SE) próximo a zero,

todos os tratamentos apresentaram valores abaixo de 0,17. Dessa forma, os modelos estudados atenderam aos três parâmetros desejados.

Na Tabela 5, são apresentados os coeficientes do modelo matemático modificado, com base nos critérios de seleção estatísticos, na modelagem das curvas de secagem do café despulpado, nas temperaturas de secagem de 35 e 40°C e para as diferentes pressões. Constatase que, para ambas as temperaturas o coeficiente D aumenta seu valor à medida que se diminui a pressão utilizada. Entretanto, o coeficiente E não apresenta nenhuma relação com as pressões estudadas.

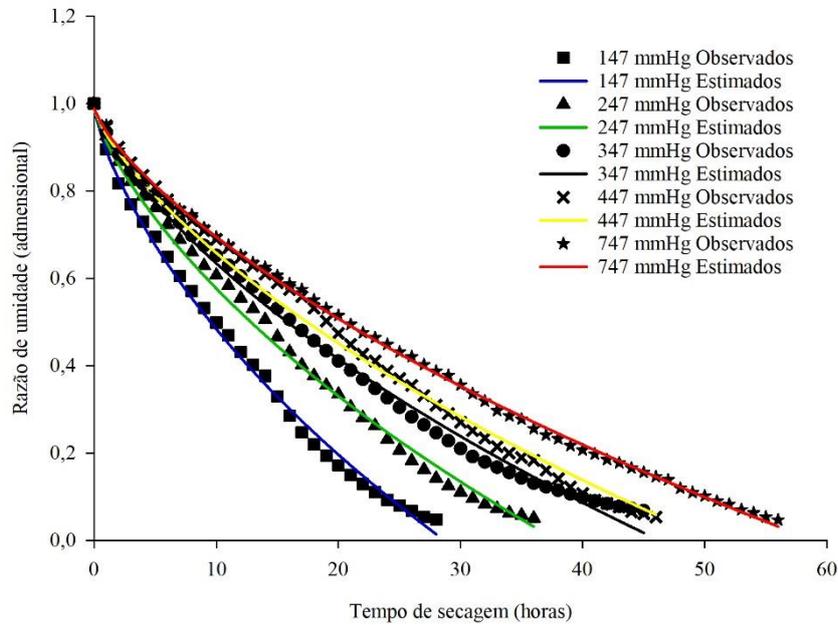
Tabela 5 - Coeficientes do modelo matemático escolhido com base nos critérios de seleção estatísticos, ajustados a curva de secagem do café despulpado, para as duas temperaturas estudadas.

Pressão (mmHg)	35°C		40°C	
	D	E	D	E
147	1,878908	0,060224	1,919939	0,045046
247	1,471612	0,047523	1,455047	0,038911
347	1,236697	0,026259	1,285056	0,050269
447	1,141800	0,038808	1,188718	0,050514
747	1,000026	0,014911	1,000174	0,043851

Fonte: Do autor (2019).

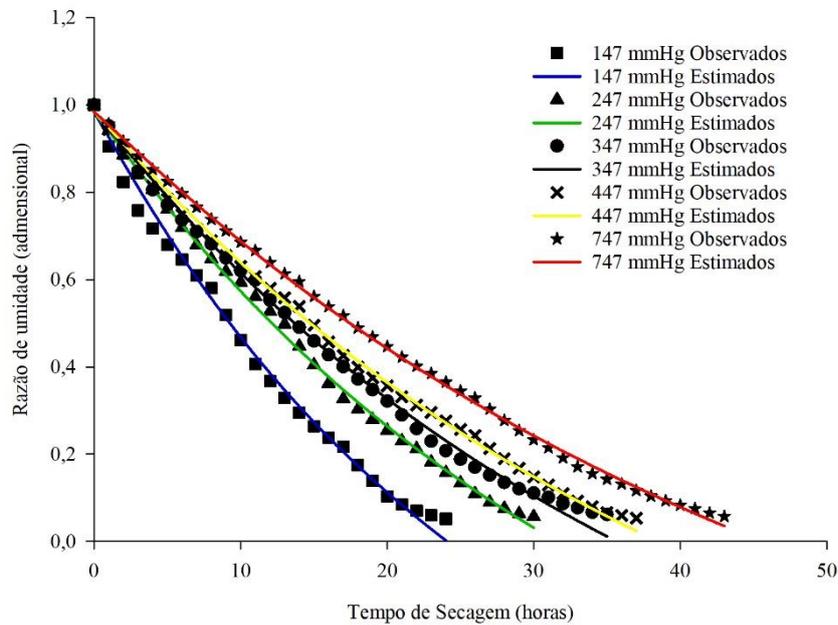
As Figuras 3 e 4 mostram os comportamentos da razão de umidade observados e estimados pelos modelos modificados, para o café despulpado nas temperaturas de 35 e 40°C durante a secagem para as diferentes pressões estudadas. Observa-se a elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os valores estimados pelo modelo, o que confirma o ajuste satisfatório desses modelos para descrever a cinética para cada condição estudada.

Figura 15 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem do café despulpado na temperatura de 35°C e nas diferentes pressões estudadas, em função do tempo.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 16 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli modificado para a secagem do café despulpado na temperatura de 40°C e nas diferentes pressões estudadas, em função do tempo.



Fonte: Do autor (2019).

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios do raio equivalente e dos coeficientes de difusão efetivos obtidos para a secagem de grãos de café, para as duas temperaturas de secagem e para as pressões absolutas utilizadas nesse experimento.

Tabela 6 – Valores de raio equivalente ( $R_{eq}$ ) e coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ) dos grãos de café despulpados, em função das combinações temperatura do ar de secagem e pressão absoluta.

Temperatura (°C)	Pressão Absoluta (mmHg)	$R_{eq} \times 10^{-3}$ (m)	$D_{eff} \times 10^{-10}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
35	747	7,34	3,1370
	447	7,42	3,5763
	347	7,30	4,0860
	247	7,39	5,0295
	147	7,39	6,9701
40	747	7,62	3,9580
	447	7,48	4,6374
	347	7,42	4,9915
	247	7,38	5,4036
	147	7,48	7,7167
CV			3,66

Fonte: Do autor (2019).

Os resultados apresentados pela análise de variância (Apêndice B), demonstraram que a temperatura do ar de secagem e a pressão absoluta tiveram efeito significativo para o coeficiente de difusividade efetivo do processo.

Na Tabela 6, observa-se que os valores do coeficiente de difusividade efetiva aumentaram linearmente com a diminuição da pressão absoluta para ambas as temperaturas de secagem. Quando se analisa as mesmas pressões variando a temperatura, verifica-se também um aumento nos valores do coeficiente de difusividade efetiva. Nota-se na pressão de 147 mmHg, para ambas as temperaturas, um maior aumento do coeficiente de difusão com relação à pressão absoluta de 247 mmHg.

O coeficiente de difusão tem um preceito no seu comportamento que é determinado por alguns fatores e explicado por outros autores. Corrêa et al. (2010), confirmam que o aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente a resistência do fluido ao escoamento e facilitando a difusão das moléculas de água nos capilares do produto. Outro fator que pode ser atribuído a esse aumento do coeficiente de difusão efetivo é que, com o

aumento da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para uma difusão mais rápida (GONELI et al., 2009).

Os valores de coeficiente de difusão efetivo obtidos para os grãos de café submetidos à secagem em pressões sub-atmosféricas, para as combinações de temperatura de pressão absoluta consideradas nesse experimento, estão de acordo com os valores obtidos em outros trabalhos elaborados com produtos agrícolas que, de acordo com Madamba, Driscoll e Buckle (1996), apresentam-se na faixa de  $10^{-9}$  a  $10^{-11}$   $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ . Em um estudo sobre a cinética de secagem de frutos de café para as temperaturas de 35, 45 e 55°C, foram encontrados valores de coeficientes de difusão efetivos de  $2,99 \times 10^{-11}$ ,  $2,39 \times 10^{-11}$  e  $5,98 \times 10^{-11}$ , respectivamente (CORRÊA et al., 2010).

## **4 CONCLUSÃO**

Diante do exposto, conclui-se que:

Os modelos Midilli, Wang & Sing, Valcam, Exponencial De Dois Termos, Thompson e Midilli Modificado alcançaram um ajuste satisfatório para descrever a secagem de grãos de café despulpados em ambas temperaturas (35 e 40°C) para a pressão atmosférica local (747 mmHg).

Dentre os 6 modelos que se ajustaram para as condições em estudo, foi escolhido o de Midilli devido a sua maior complexidade para a descrever a cinética de secagem em condições sub-atmosféricas.

O modelo de Midilli modificado apresentou um ajuste satisfatório para descrever a cinética de secagem a vácuo para cada condição estudada. Proporcionando um novo modelo para o estudo da secagem a baixas pressões.

## **5 AGRADECIMENTOS**

CAPES, FAPEMIG e CNPq.

## REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 384 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

ALVES, G. E. **Cinética de secagem e qualidade do café para diferentes temperaturas e fluxos de ar**. 2013. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

ARÉVALO-PINEDO, A.; MURR, F. E. X. Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 4, p. 636-643, 2005.

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**, Essex, v. 65, n. 3, p. 449-458. 2004.

BALA, B.K. 1983. **Deep bed drying of malt**. Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992.

BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 99, n. 4, p. 430-436, 2010.

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

CHEN, X. D.; MUJUMDAR, A. S. **Drying technologies in food processing**. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltda., 2008. 322 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café, safra 2019 primeira estimativa, jan/2019**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica*L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010a.

CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.

COSTA, C. F. et al. Mathematical modeling and determination of thermodynamic properties of jaboticaba peel during the drying process. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 6, p. 576-580, 2016.

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **LWT - Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 41, n. 5, p. 789-795, 2008.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Wiley, 1998. 712 p.

FOROUGH-DAHR, M. et al. On the characteristics of thin layer drying models for intermittent drying of rough rice. **Journal Chemical Engineering Communications**, London, v. 202, n. 8, p. 1024-1035, 2015.

GHAZANFARI, A. et al. Thin-layer drying of flax fiber: II., modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. **Drying Technology**, New York, v. 24, n. 12, p. 1637-1642, Apr. 2006.

GONELLI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 11, p. 64-73, 2009. Edição especial café.

GONELLI, A. L. D. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, p. 1167-1168, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, p. 169-174, 1961.

HERNÁNDEZ-DÍAZ, W. N. et al. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 86, n. 1, p. 1-9, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Green coffee: determination of loss in mass at 105°C: ISO 6673**. Geneva, 2003. 17 p.

ISQUIERDO, E. P. **Cinética de secagem de café natural e suas relações com a qualidade para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar**. 2011. 157 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

ISQUIERDO, E. P. et al. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 56, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 39, n. 4, p. 337-344, 1999.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, Feb. 2007.

KASSEM, A. S. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON AGRICULTURAL MECHANIZATION AND ENERGY, 13., 1998, Morocco. **Proceedings...** Morocco, 1998. Disponível em: <<http://www.sciepub.com/reference/161007>>. Acesso em: 18 mar. 2019.

KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 505 p.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

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

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

NILNONT, W. et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica* L.) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Essex, v. 20, p. 341-350, Apr. 2012.

OLIVEIRA, G. H. H. et al. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 45, n. 3, p. 546-554, Mar. 2010.

OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers**. 1949. Thesis (Ph.D.) - Purdue University, Lafayette, 1949.

PRATES, M. F. O. et al. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Medicinai**s, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 514-521, 2012.

PUTRANTO, A. et al. Mathematical modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 105, n. 4, p. 638-646, 2011.

RADÜNZ, L. L. et al. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, n. 1, p. 19-27, 2011.

REIS, R. C. et al. Cinética de secagem de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 12, p. 1346-1352, 2012.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea Canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009.

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

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, v.23, p.1.261-1.265, 1980.

SILVA, H. W. et al. Kinetics and thermodynamic properties related to the drying of 'Cabacinha' pepper fruits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 2, p. 174-180, 2016.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Londrina, v. 34, n. 3, p. 231-238, 2012b.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.

TAVEIRA, J. H. S. **Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2009. 67 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

THOMPSON, T. L.; PEARTT, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-589, 1968.

VERMA, L. R. et al. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 28, n. 1, p. 296-301, 1985.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **A single layer drying equation for rough rice**. Saint Joseph: ASAE, 1978. (Paper, 78-3001).

WU, L. et al. Vacuum drying characteristics of eggplants. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 83, n. 3, p. 422-429, 2007.

## APÊNDICES

### Apêndice A: Tabela 1A

Tabela 1A – Análise de variância do tempo de secagem em função da temperatura do ar de secagem e da pressão absoluta.

FV	GL	QM	Pr>Fc
Temperatura	1	664.225	0,001*
Pressão	4	656.5	0,001*
Temperatura X Pressão	4	21.475	0,001*
Resíduo	27	0.380556	

CV (%) = 1,64; Média Geral = 37,63; \*Significativo a 5% de probabilidade.

### Apêndice B: Tabela 2A

Tabela 2A – Análise de variância do coeficiente de difusividade efetivo ( $D_{eff}$ ) em função da temperatura do ar de secagem e da pressão absoluta.

FV	GL	QM	Pr>Fc
Temperatura	1	152.749	0,0024*
Pressão	4	432.331	0,0002*
Resíduo	4	3.279	

CV (%) = 3,66; Média Geral = 49,51; \*Significativo a 5% de probabilidade.