



**HULLY ALVES ROCHA**

**SECAGEM A VÁCUO DE CAFÉS  
DESCASCADOS: CINÉTICA DE SECAGEM E  
EFEITOS FISIOLÓGICOS**

**LAVRAS – MG**

**2018**

**HULLY ALVES ROCHA**

**SECAGEM A VÁCUO DE CAFÉS DESCASCADOS: CINÉTICA DE  
SECAGEM E EFEITOS FISIOLÓGICOS**

Dissertação 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 Mestre.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa  
Orientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém  
Coorientador

**LAVRAS- MG**

**2018**

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

Rocha, Hully Alves.

Secagem a vácuo de cafés descascados: cinética de secagem e  
efeitos fisiológicos / Hully Alves Rocha. – 2018.

62 p. : il.

Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Coorientador: Flávio Meira Borém.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. *Coffea arabica* L. 2. Vácuo. 3. Taxa de secagem. I. Corrêa,  
Jefferson Luiz Gomes. II. Borém, Flávio Meira. III. Título.

**HULLY ALVES ROCHA**

**SECAGEM A VÁCUO DE CAFÉS DESCASCADOS: CINÉTICA DE  
SECAGEM E EFEITOS FISIOLÓGICOS**

**VACUUM DRYING OF PEELED COFFEE BEANS: DRYING KINETICS  
AND PHYSIOLOGICAL EFFECTS**

Dissertação 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 Mestre.

APROVADA em 23 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade UFLA

Prof. Dr. Márcio Bezerra Machado University of Alberta

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa UFLA

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa  
Orientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém  
Coorientador

**LAVRAS- MG**

**2018**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À minha família, por todo amor, apoio, incentivo e confiança.

A Universidade Federal de Lavras e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador Jefferson, por aceitar me orientar e por toda contribuição durante o mestrado.

Ao professor Flávio, pela coorientação e todo suporte técnico para realização do projeto.

Aos professores Márcio e Ednilton, pelas colaborações para a melhoria do trabalho.

Aos Laboratórios de Processamento de Produtos Agrícolas (DEG), Laboratório de Análise de Sementes (DAG), Laboratório de Análise de Solos (DCS) e Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (DFP), pela realização das análises e toda ajuda necessária.

Aos meus amigos e a todos que de alguma maneira contribuíram para que esse objetivo fosse alcançado.

## RESUMO

O processo de secagem é fundamental para os grãos, pois, em geral, esses produtos são colhidos com alto teor de água, o que favorece a rápida deterioração. Quando não realizada de forma adequada, a secagem pode ocasionar danos aos produtos e, conseqüentemente, queda na qualidade. Diversas alterações físicas, fisiológicas e bioquímicas podem ocorrer nos grãos durante a secagem. Análises fisiológicas vêm sendo utilizadas como indicadores dessa qualidade. Tradicionalmente, a secagem mecânica com ar aquecido é utilizada para café. Porém, em decorrência de sua baixa eficiência, há uma necessidade de alternativas que permitam reduzir o tempo de secagem sem alterar a qualidade do café. Tendo em vista que a secagem a vácuo propicia tempos menores de exposição, pela redução da pressão de vapor, objetivou-se, com este trabalho, obter a cinética de secagem e os efeitos fisiológicos causados no café no estágio de maturação cereja, processados por via úmida (em pergaminho, descascado) quando submetidos à secagem a vácuo. Após o processamento, foram secados em uma estufa a vácuo, sob pressões absolutas de 147, 447 e 747 mmHg (em pressão atmosférica local de 747 mmHg) e temperatura do ar de secagem de 40°C, até atingirem 11 kg de água 100 kg de material<sup>-1</sup>. Após a secagem, as amostras foram mantidas sem beneficiamento e armazenadas na temperatura de 10°C e 50% de umidade relativa, por 30 dias. Os cafés foram avaliados por meio dos testes de condutividade elétrica, lixiviação de potássio, teste de germinação, análises de microscopia eletrônica de varredura e pela cinética de secagem. Para as análises fisiológicas, utilizou-se a análise exploratória multivariada de componentes principais (PCA), com o objetivo de correlacionar os efeitos das características fisiológicas com as pressões de vácuo utilizadas. Para o ajuste dos modelos matemáticos foi realizada uma análise de regressão não linear pelo método Quasi-Newton. Concluiu-se que o uso do vácuo reduziu significativamente o tempo de secagem, o modelo que melhor se ajustou foi o de Page Modificado. A secagem submetida à pressão absoluta de 447 mmHg não apresentou dano às estruturas celulares do grão, não diferindo da pressão absoluta local, 747 mmHg, porém, em relação as outras pressões a pressão absoluta de 147 mmHg possui mais íons de potássio lixiviado, que podem estar associados a danos na estrutura celular. Por meio das eletromicrografias foi possível observar a diferença da parede celular dos grãos de acordo com a redução do vácuo.

**Palavras – chave:** *Coffea arabica* L. Vácuo. Taxa de secagem. Análises Fisiológicas.

## ABSTRACT

The drying process is a very important step for a large part of the grains, because, in general, these products are harvested with high moisture contents, which favors rapid deterioration. When not properly performed, drying can cause damage to the products, consequently causing quality decrease. Several physical, physiological and biochemical changes can occur in the grains during drying. Physiological analyzes have been used as indicators of this quality. Traditionally, mechanical drying with heated air is used for coffee grains. However, due to its low efficiency, alternatives that allow reducing the drying time without changing the quality of the coffee are required. Considering that vacuum drying provides smaller exposure times by reducing the vapor pressure, this study aimed at assessing the drying kinetics and the physiological effects caused in peeled coffee beans, when subjected to vacuum drying. Coffee fruits were studied at the maturation stage and processed by wet conventional methods (parchment, peeled). After processing, the grains were dried in a vacuum oven under absolute pressures of 147, 447 and 747 mmHg (at local atmospheric pressure of 747 mmHg) at 40 °C, until reaching 11 kg of water / kg of material. After drying, the samples were stored under controlled conditions of refrigerated air (10 °C and 50% relative humidity) for 30 days in order to obtain uniform moisture content of the fruits. Coffee grains were evaluated by electrical conductivity, potassium leaching, germination, scanning electron microscopy and drying kinetics. Multivariate exploratory principal component analysis (PCA) was used for the physiological analyzes, with the objective of correlating the effects of the physiological analyzes with the used vacuum pressures. For the adjustment of the mathematical models, a non-linear regression analysis was performed using the Quasi-Newton method. It was concluded that the use of vacuum significantly reduced the drying time. The model that better adjusted was the Page Modified. Drying under absolute pressure of 447 mmHg was an interesting alternative to the conventional one because it showed no damage to the cellular structures of the grain, which was similar to the obtained in the local pressure of 747 mmHg. However, the lowest pressure, 147 mmHg, led to significant alterations in the grain quality.

**Key words:** *Coffea arabica* L. Vacuum. Drying rate. Physiological Analysis

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes constituintes do fruto do cafeeiro. ....	14
Figura 2 - Esquema representando as etapas de colheita e pré-processamento. ....	15
Figura 3 - Representação de uma repetição do teste de germinação.....	33
Figura 4 - Amostra com as quatro repetições.....	33
Figura 5 - Amostra pronta para ser encaminhada ao germinador. ....	34
Figura 6 - Teste de condutividade elétrica. ....	35
Figura 7 - Cinética de secagem de grãos de café utilizando temperatura do ar de 40°C. ....	39
Figura 8 - Valores experimentais da razão de umidade ( $M_r$ ) observado e estimado pelo modelo de Page Modificado para a secagem de grãos de café utilizando a temperatura do ar de 40°C. ....	44
Figura 10 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café (A) cereja descascado após a secagem à pressão absoluta de 747 mmHg.....	46
Figura 11 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café (B) cereja descascado após a secagem à pressão absoluta de 447 mmHg.....	46
Figura 12 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café (C) cereja descascado após a secagem à pressão absoluta de 147 mmHg.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos matemáticos usados para ajuste das curvas de secagem. ....	23
Tabela 2 - Parâmetros de ajuste dos modelos da cinética de secagem de café cereja descascado e valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ). ....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
<b>2.1</b>	<b>Importância do café no Brasil</b> .....	13
<b>2.2</b>	<b>Colheita e pré-processamento do café</b> .....	13
<b>2.3</b>	<b>Secagem do café</b> .....	16
<b>2.3.1</b>	<b>Métodos de secagem mais utilizados para café</b> .....	17
<b>2.3.2</b>	<b>Teoria da secagem</b> .....	18
<b>2.3.3</b>	<b>Taxa de secagem</b> .....	20
<b>2.3.4</b>	<b>Modelagem matemática e simulação da secagem do café</b> .....	21
<b>2.4</b>	<b>Secagem a vácuo</b> .....	24
<b>2.5</b>	<b>Análises fisiológicas</b> .....	25
<b>2.5.1</b>	<b>Teste de germinação</b> .....	26
<b>2.5.2</b>	<b>Condutividade elétrica e lixiviação de potássio</b> .....	27
<b>2.5.3</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura</b> .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
<b>3.1</b>	<b>Material</b> .....	29
<b>3.2</b>	<b>Colheita e pré-processamento</b> .....	29
<b>3.3</b>	<b>Determinação do teor de água</b> .....	29
<b>3.4</b>	<b>Sistema de secagem</b> .....	30
<b>3.5</b>	<b>Cinética de secagem</b> .....	32
<b>3.6</b>	<b>Análises fisiológicas</b> .....	33
<b>3.6.1</b>	<b>Teste de germinação</b> .....	33
<b>3.6.2</b>	<b>Condutividade elétrica</b> .....	34
<b>3.6.3</b>	<b>Lixiviação de potássio</b> .....	35
<b>3.6.4</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....	36
<b>4</b>	<b>DELINEAMENTO ESTATÍSTICO</b> .....	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
<b>5.1</b>	<b>Cinética de secagem</b> .....	39
<b>5.1.1</b>	<b>Modelagem da cinética de secagem</b> .....	40
<b>5.2</b>	<b>Análises fisiológicas</b> .....	44
<b>5.2.1</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</b> .....	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	49
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	51
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura do café possui grande expressividade dentro da economia brasileira. Quando recém-colhidos, os frutos de café possuem teores de água variando de 30% (b.u) a 60% (b.u), favorecendo a sua rápida deterioração. Dessa forma, o processo de secagem é uma etapa fundamental para a conservação dos grãos durante o período de armazenamento, evitando o ataque de pragas, desenvolvimento de microrganismos e fermentações indesejáveis, que podem comprometer a qualidade do café. O teor de água ideal para o armazenamento de grãos de café é 11% (b.u.) (BORÉM, 2014).

A secagem do café é uma operação unitária de grande importância na pós-colheita, uma vez que influencia diretamente na qualidade do grão. Apesar de seus benefícios, quando não controlada, pode causar danos ao produto, depreciando a qualidade final.

A tecnologia geralmente utilizada na secagem do café é baseada em variações na temperatura e no fluxo de ar de secagem. Porém, temperaturas do ar de secagem entre os grãos de café acima de 40°C causam danos térmicos que depreciam a qualidade do produto (ISQUIERDO et al., 2013; LIVRAMENTO et al., 2017; OLIVEIRA, 2015; OLIVEIRA et al., 2013; TAVEIRA et al., 2012).

A secagem a vácuo é uma alternativa à secagem com ar aquecido. Ela possibilita a evaporação de água em baixas temperaturas com o aumento da taxa de secagem e consequente diminuição do tempo de secagem. Isto, ainda, sob atmosfera com baixa concentração de oxigênio, que diminui processos degradativos. Pode ser indicada, dessa forma, à secagem de café. Observa-se que não há trabalhos publicados sobre o tema.

O interesse pelo desenvolvimento de sistemas de secagem com alta taxa de secagem, temperaturas menos elevadas, que não causem danos à estrutura celular dos grãos, propõe um estudo da secagem do café descascado submetido a

vácuo e seus efeitos, com base em análises fisiológicas e na cinética de secagem, como indicadores de qualidade.

Nesse contexto, este trabalho objetivou:

- a) Determinar o efeito do vácuo na secagem de cafés cereja descascado;
- b) Avaliar a cinética de secagem nas pressões estudadas;
- c) Realizar o ajuste das curvas de secagem com modelos empíricos da literatura;
- d) Avaliar os efeitos da secagem à qualidade fisiológica dos grãos.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

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

O café foi introduzido no Brasil no ano de 1727 e após a revolução industrial houve grande aumento do consumo da bebida; no século XIX tornou-se o principal produto de exportação do país (BAER, 2002). Atualmente, o Brasil ocupa a primeira posição de produtor e exportador do produto e a estimativa de produção para o ano de 2018 está entre de 54,4 e 58,5 milhões de sacas beneficiadas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2018).

Nesse contexto, a qualidade do produto é um fator fundamental na conquista de novos mercados. Os atributos de qualidade do café englobam uma ampla gama de conceitos, que vão desde características físicas, como origens, cultivares, cor e tamanho, até preocupações de ordem ambiental e social, como os sistemas de produção e as condições de trabalho da mão de obra cafeeira (BRAZILIAN SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION CAFÉS ESPECIAIS - BSCA, 2018).

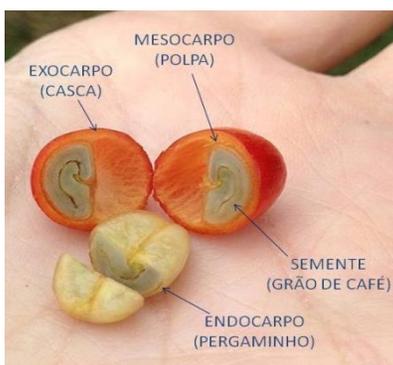
### **2.2 Colheita e pré-processamento do café**

Há três formas de colheita do café: manual, semimecanizada e mecanizada, podendo ser realizadas por derriça completa ou colheita seletiva. Por derriça completa são colhidos frutos em todos os estádios de maturação (verde, verde-cana, maduro, passa e seco) juntamente com impurezas; na colheita seletiva, apenas os frutos maduros são colhidos (BORÉM, 2014).

A etapa seguinte à colheita é o pré-processamento, em que dois diferentes métodos são usados: via seca, pelo qual os frutos são processados em

sua forma integral (endosperma, endocarpo, mesocarpo e exocarpo), produzindo, após a secagem, cafés em coco ou natural; e via úmida, que origina os cafés em pergaminho, denominados descascados, despulpados e desmucilados.

Figura 1 - Partes constituintes do fruto do cafeeiro.

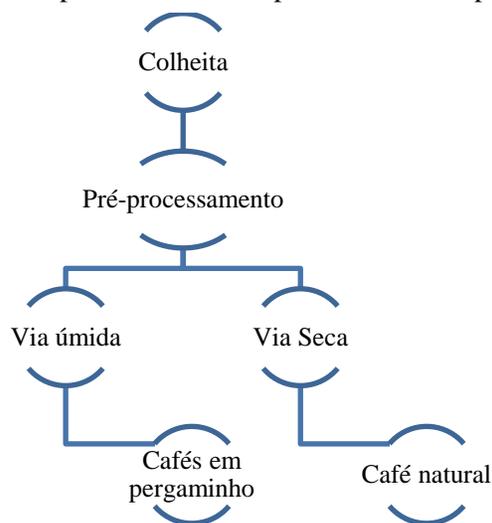


Fonte: Aventuras da Barista (2015).

Nos cafés descascados, remove-se o exocarpo e parte do mesocarpo mecanicamente; nos despulpados o exocarpo é retirado de forma mecânica e o mesocarpo por meio de fermentação biológica e nos cafés desmucilados o exocarpo e todo o mesocarpo é retirado mecanicamente (BORÉM, 2014).

O pré-processamento do café tem a finalidade de promover a separação dos frutos em lotes mais homogêneos. Essa 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).

Figura 2 - Esquema representando as etapas de colheita e pré-processamento.



Fonte: Borém (2014).

Independente do pré – processamento, em relação aos aspectos fisiológicos, os grãos de café permanecem viáveis. Contudo, grãos de café processados por via úmida parecem ter qualidade fisiológica superior aos processados via seca (ALVES, 2013; MALTA et al., 2013; TAVEIRA et al., 2012). Uma das hipóteses para esse fenômeno é o maior período de exposição ao ar de secagem que os grãos naturais são submetidos, por possuírem maior teor de água quando comparados aos grãos descascados. Essa situação expõe o embrião e o endosperma a danos térmicos mais severos, favorecendo a maior perda da integridade das membranas celulares (ALVES, 2013; SAATH et al., 2012; TAVEIRA et al., 2012). A manutenção da integridade das membranas pode influenciar de forma positiva, sendo utilizada como um indicador de qualidade.

Alternando a temperatura de secagem de frutos de café, nos processamentos via úmida e via seca, em quatro métodos de secagem (secagem em terreiro, e secagem mecânica com ar aquecido a 50/40°C, 60/40°C e

40/60°C), até atingirem 11 kg de água 100 kg de material<sup>-1</sup> Oliveira (2010) constatou que o processamento via úmida é mais tolerante à secagem do que o processamento via seca independente do método de secagem, apresentando melhores resultados das análises fisiológica.

A presença do exocarpo nos grãos de café natural oferece maior resistência às trocas de energia e massa dentro dos grãos durante a secagem, promovendo uma tensão superior à suportada pela estrutura celular dos grãos (SAATH et al., 2012).

### **2.3 Secagem do café**

Em geral, os frutos de café são colhidos com teores de água variando entre 30 kg de água 100 kg de material<sup>-1</sup> e 65 kg de água 100 kg de material<sup>-1</sup>, dependendo de seu estágio de maturação, estando sujeita à rápida deterioração. Portanto, antes de ser armazenado, o café deverá ser necessariamente, seco. Mesmo existindo outras formas de preservação utilizadas para outros alimentos, a secagem é a mais utilizada para o café. Entre as várias etapas da pós-colheita do café, a secagem é a etapa de maior relevância, em relação ao consumo de energia, custos de processamento e também da manutenção da qualidade do produto (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014; BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; DONG et al., 2017).

Temperaturas do ar de secagem acima de 40°C causam danos térmicos que depreciam a qualidade do café (ISQUIERDO et al., 2013; MARQUES, 2006; OLIVEIRA, 2015; TAVEIRA et al., 2012).

Oliveira (2015) avaliou frutos de cafés processados via úmida e via seca em sete diferentes métodos de secagem, chegando também à conclusão de que o processamento via úmida tem maior tolerância à secagem e melhor qualidade

fisiológica. As temperaturas de secagem 35/40°C e 40/35°C, comportaram de forma semelhante, sem ruptura aparente da parede celular do grão.

Alves et al. (2017) correlacionaram algumas 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. Constataram também, a maior sensibilidade de cafés processados por via seca à secagem mecânica, apresentando os piores desempenhos fisiológicos. Naquele estudo, o fluxo de ar não interferiu na qualidade fisiológica; a elevação da temperatura de 40°C para 45°C, em cafés processados via úmida, apresentou queda na qualidade fisiológica e a elevação da taxa de secagem, por meio da elevação do fluxo de ar de secagem para temperatura de 40°C, teve efeito negativo na qualidade sensorial do café despulpado.

### **2.3.1 Métodos de secagem mais utilizados para café**

Existem diversos métodos de secagem já utilizados para o café, entre eles se destacam:

- a) Secagem natural: quando a secagem dos frutos é realizada ainda na planta;
- b) Secagem artificial: quando há a retirada dos frutos da planta para que se inicie o processo de secagem.

Os métodos artificiais de secagem podem ser divididos em:

- a) Secagem em terreiros: onde o produto úmido é exposto ao sol em superfícies planas;

- b) Estufa: o produto é exposto ao sol em superfície plana e ao anoitecer coberto. Recomendado para locais com alta umidade relativa durante a noite e nas primeiras horas da manhã;
- c) Terreiro secador: se diferencia dos terreiros, pois a secagem é combinada com ar quente por uma fornalha nos períodos nublados;
- d) Secagem com altas temperaturas: que são realizadas em secadores mecânicos, mais comumente são utilizados os secadores horizontais (rotativos) e secadores verticais (BORÉM, 2014).

### **2.3.2 Teoria da secagem**

O processo de secagem é definido como a operação de transferência simultânea de calor e massa que promove a remoção do excesso de água contida no grão por meio da evaporação, tornando-se indicada como método de conservação em longo prazo (ALVES et al., 2013; BORGES et al., 2011; FANTE et al., 2011).

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 secado e a pressão parcial do ar de secagem. Para que ocorra secagem, é necessário que a pressão parcial de vapor d'água em sua superfície seja maior do que a pressão parcial de vapor do ar de secagem (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014; BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008).

Para selecionar o processo, tempo e temperatura adequados para a secagem de produtos agrícolas, o estudo da cinética de secagem é de grande importância e tem como objetivo manter a qualidade dos produtos (AVHAD; MARCHETTI, 2016).

Para grande parte de produtos biológicos, o processo de secagem em condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de

secagem, podem ser divididos em um período de taxa constante e outro de taxa decrescente (BORÉM, 2014).

As sementes, em geral, apresentam o período de secagem com taxa constante muito curto, porque, nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água encontram-se essencialmente no seu interior, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície (CORRÊA et al., 2010).

O período de velocidade constante ocorre nas primeiras horas de secagem, quando o produto 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, por meio do fenômeno de difusão, 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, 2014).

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, conseqüentemente, 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 (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014; BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992).

A remoção de água impede o crescimento e reprodução de microrganismos que causam deterioração e reduz ao mínimo as reações que ocorrem, em razão da presença de água, baseando-se que há uma redução na

atividade de água (0,93 e 0,99 a faixa ideal para o desenvolvimento de fungos do gênero *Aspergillus sp* na faixa de temperatura de 25°C a 32°C) (OLIVEIRA, 2016; PARDO et al., 2005); essa redução do teor de água dos produtos agrícolas ocasiona uma diminuição de massa e volume, e ainda contribui para um armazenamento prolongado (CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1974; DOYMAZ, 2008).

### **2.3.3 Taxa de secagem**

Taxa de secagem é a relação entre a quantidade de água que é perdida pelo produto em certo período de tempo. Ela pode ser influenciada por fatores como: método de secagem, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, umidade inicial do produto e tempo de exposição do produto à temperatura de secagem, entre outros. A falta do controle desses fatores pode comprometer a qualidade do produto final (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014).

A temperatura do ar de secagem é o principal fator de influência, também associada à qualidade. Temperaturas mais altas tornam a secagem mais rápida, conseqüentemente, mais econômica (BURMESTER; EGGERS, 2010). Herman-Lara et al. (2010) verificaram um aumento na taxa de secagem, provocado pela elevação da temperatura e do fluxo de ar de secagem.

Avaliando a influência da temperatura sobre o tempo de secagem em frutos de Palma, observou-se que para a variação de temperatura de 50°C para 70°C o tempo de secagem foi reduzido de 720 minutos para 540 minutos (SANTOS et al., 2016). Camicia et al. (2015) observaram uma redução do tempo de secagem para o feijão-caupi de 10,4 horas para 2,1 horas para as temperaturas de 30°C e 50°C, respectivamente.

Durante a secagem de frutos de café com a utilização de três diferentes condições de temperatura e umidade relativa (35 °C e 32,1%; 45 °C e 15,7%; e 55 °C e 10,2%), Corrêa et al. (2010), observaram que maiores temperaturas acarretaram em maior taxa de secagem, chegando ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de exposição do produto ao ar de secagem.

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).

Uma alternativa para aumentar a taxa de secagem sem causar danos térmicos aos grãos é a redução da umidade relativa do ar de secagem por outros meios, tais como a circulação do ar através de um material dessecante, que adsorve e remove a umidade do ar de secagem ou pela redução da temperatura de ponto de orvalho do ar (KRZYZANOWSKI; WEST; FRANÇA NETO, 2006; ONDIER; SIEBENMORGEN; MAUROMOUSTAKOS, 2010).

A tecnologia disponível atualmente para a secagem de café só permite que a taxa de secagem seja aumentada com o aumento da temperatura e do fluxo de ar, porém, em diversas pesquisas tem sido demonstrado que, quando se visa à produção de cafés de qualidade superior, a temperatura da massa de café não pode ultrapassar 40 °C (ISQUIERDO et al., 2013; SAATH et al., 2010).

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

De acordo com Corrêa et al. (2011) e Resende et al. (2010) a simulação matemática do processo de secagem é fundamental para o desenvolvimento e

aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos e 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.

Os estudos da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos. Na literatura, são descritos vários métodos (teóricos, semiempíricos e empíricos) para se analisar a secagem de produtos higroscópicos: sementes de crambe (FARIA et al., 2012), sementes de abóbora (SACILIK, 2007), sementes de amaranto (ABALONE et al., 2006), grãos de trigo parboilizados (MOHAPATRA; RAO, 2005), dentre outros (BURMESTER; EGGERS, 2010; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011).

Os métodos semiempíricos e empíricos de análise do processo de secagem, que geralmente 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 consideram que todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente (RESENDE et al., 2009).

Esses métodos baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, presumindo-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 (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014).

Apesar de várias teorias terem sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes as

relações semiempíricas e empíricas 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 as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Na literatura, são encontrados trabalhos que apresentam modelos empíricos para prever o processo de secagem do café em terreiros (AFONSO JUNIOR, 2001; CORRÊA; QUEIROZ; AFONSO JUNIOR, 2001), assim como trabalhos para a secagem mecânica de café (SIQUEIRA et al., 2017).

Diversos modelos têm sido ajustados para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos. Dentre eles, estão os modelos de Midilli, de Page, de Logaritmo, de Henderson e Pabis, de Page modificado, de dois termos, de exponencial de dois termos, de Newton, e de Wang e Sing (AKPINAR, 2010; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010; ISQUIERDO et al., 2013; KAYACAN; SAGDIC; DOYMAZ, 2018; SOUSA et al., 2011), apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos usados para ajuste das curvas de secagem.

(continua)

Modelo	Equação	Referência	
Page	$M_r = e^{(-kt^n)}$	Page (1949)	(4)
Henderson e Pabis	$M_r = ae^{(-kt)}$	Henderson e Pabis (1961)	(5)
Logarítimo	$M_r = ae^{(-kt)} + c$	Doymaz (2007)	(6)
Midilli	$M_r = ae^{(kt^n)} + bt$	Midilli, Kucuk e Yapar (2002)	(7)
Newton	$M_r = e^{(-kt)}$	Callaghan, Menzies e Bailey (1971)	(8)
Wang Singh	$M_r = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh (1978)	(9)

Tabela 1 - Modelos matemáticos usados para ajuste das curvas de secagem.

(conclusão)

Modelo	Equação	Referência	
Page Modificado	$M_r = e^{[-(kt)^n]}$	Özdemir e Onur Devres (1999)	(10)
Aproximação Por Difusão	$M_r = ae^{(-kt)} + (1-a)e^{(-kbt)}$	Kassem (1998)	(11)
Dois Termos Exponencial	$M_r = a.e^{(-kt)} + (1-a).e^{(-kat)}$	Henderson (1974)	(12)

Fonte:(ALVES et al., 2013; BROOKER; BAKER-ARKEMA; HALL, 1992; CORRÊA et al., 2010).

$M_r$  – Razão de umidade (adimensional);  $k$  - constante de secagem ( $s^{-1}$ ),  $t$  – tempo de secagem, em min;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $n$  – constantes que dependem da natureza do produto, adimensional.

A evolução da secagem com o tempo pode ser ajustada por modelos empíricos, fenomenológicos ou numericamente. Siqueira et al. (2017) observaram que modelos empíricos podem ser utilizados para a predição de cinética de secagem de café e que, dentre os estudados, o modelo de Midilli foi o que apresentou melhor ajuste.

## 2.4 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). Todavia, a secagem a vácuo é uma alternativa à secagem convencional. Possui vantagens como o aumento de taxa de secagem e menor exposição ao oxigênio, reduzindo as chances de degradação dos constituintes presentes nos alimentos (AGHBASHLO et al., 2013; ORIKASA et al., 2014).

A secagem a vácuo é um processo em que o material úmido é seco sob pressão subatmosférica (ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005) e uma de suas

características é que, a oxidação do produto é evitada, pois, o contato do produto com o ar durante o processo de secagem diminui. Portanto, os atributos sensoriais e nutritivos dos alimentos são efetivamente mantidos, em decorrência do tempo comparativamente curto à exposição e à baixa temperatura de secagem (HORECKI et al., 2018; KAYACAN; SAGDIC; DOYMAZ, 2018; WU et al., 2007).

Os materiais geralmente submetidos a esse tipo de secagem são aqueles que possuem componentes termo-sensíveis, facilmente oxidáveis ou que sejam altamente higroscópicos (FERNANDO; THANGAVEL, 1987; MALCZEWSKIKAMINSKI; KACZMAREK, 1989; NASTAJ, 1989).

Esse método de secagem é mais comumente utilizado para a secagem de alimentos como rabanete (LEE; KIM, 2009), cenoura e abóbora (ARÉVALO-PINEDO; MURR, 2005), pequi (FIGUEIRA et al., 2014), berinjela (REIS; MASSON; WASZCZYNSKYJ, 2006), manjerição (FERREIRA; SILVEIRA JUNIOR, 1999), dentre outros alimentos (HORECKI et al., 2018; KAYACAN; SAGDIC; DOYMAZ, 2018), sendo pouco utilizada para a secagem de grãos, ainda não foi estudada para frutos de café.

Esse método de secagem pode ser considerado intermediário, entre a secagem convectiva e a liofilização, pois é capaz de trabalhar em baixas pressões (menores que 100 mmHg), obtendo-se maiores taxas de evaporação de água e um produto final de melhor qualidade se comparado com a secagem convencional com ar quente (DEBS-LOUKA et al., 1996; KOMPANY et al., 1990; KROKIDA; MAROULIS, 1997).

## **2.5 Análises fisiológicas**

Morfológicamente, grãos e sementes são iguais, suas estruturas básicas são as mesmas, constituído de endosperma e embrião. Entretanto, eles se

diferem quanto a sua finalidade. Os grãos são produzidos para o consumo de animais e seres humanos, enquanto as sementes possuem a função de reprodução vegetal e de perpetuação da espécie. Por serem morfológicamente iguais, os eventos que deterioram uma semente também deterioram um grão. Dessa forma, avaliações fisiológicas podem ser utilizadas para avaliação da qualidade de grãos de café (ABREU, 2015).

Diversos trabalhos têm utilizado as análises fisiológicas como indicadores de qualidade, associados a outras análises (químicas e sensorial) (BORÉM, 2008; BORÉM et al., 2014; MALTA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013; SAATH et al., 2012; TAVEIRA et al., 2012; TOSTA, 2014). Esses indícios podem ser observados por meio de testes de germinação, condutividade elétrica, lixiviação de potássio, por meio de eletromicrografias, entre outras análises.

### **2.5.1 Teste de germinação**

O teste de germinação tem como objetivo, determinar o potencial máximo de germinação de um determinado lote de sementes, permitindo comparar a qualidade dos lotes e também estimar o valor de germinação em campo (BRASIL, 2009).

O aparecimento de injúrias em sementes de café, no processamento e na secagem, tem sido apontado com uma das principais causas de perda da qualidade fisiológica (OLIVEIRA et al., 2013).

Oliveira et al. (2013) observou que, durante o processo de secagem, as sementes sofrem mudanças físicas, provocadas por gradientes de temperatura e teor de água, que ocasionam a redução da porcentagem e da velocidade da germinação, além de aumentar o percentual de plântulas anormais. Os mesmos autores também compararam a secagem de café no terreiro e em secadores

mecânicos, os cafés secados em terreiro apresentaram melhores resultados fisiológicos, quando comparados a secadores mecânicos.

Diante disso, trabalhos realizados por Malta et al. (2013), Oliveira et al. (2013) e Taveira et al. (2012), buscaram relacionar a qualidade fisiológica com a qualidade sensorial em grãos de café, e lotes com maior porcentagem de germinação, obtiveram qualidade sensorial superior quando comparados a lotes com menores porcentagens de germinação.

### **2.5.2 Condutividade elétrica e lixiviação de potássio**

Durante a secagem do café, se mal conduzida, podem ocorrer alterações fisiológicas que comprometem a qualidade do grão. Os testes de condutividade elétrica e lixiviação de potássio indicam possíveis danos ao sistema de membranas celulares (ALVES et al., 2007; BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; CORADI et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2013; SAATH et al., 2012; SPONCHIADO; SOUZA; COELHO, 2014). O aumento desses valores indicam desorganização das membranas celulares, acompanhada por uma perda de controle de permeabilidade e pelo extravasamento de solutos, resultando em produtos indesejáveis e prejudiciais a qualidade fisiológica e sensorial dos grãos de café (BORÉM, 2014; CORADI et al., 2007; MALTA; PEREIRA; CHAGAS, 2005).

### **2.5.3 Microscopia eletrônica de varredura**

Durante a pós-colheita, os grãos estão sujeitos a ações deteriorativas que comprometem a qualidade e o desempenho fisiológico, a perda da integridade das membranas é uma das principais alterações relacionadas ao processo de deterioração (BORÉM et al., 2013; MCDONALD, 1999; SAATH et al., 2010).

Portanto, visualizar por meio de micrografias a estrutura celular dos grãos de café torna-se uma ferramenta importante para compreender tal fenômeno.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Material**

Os frutos de café foram obtidos em um campo experimental da Agência de Inovação do Café (InovaCafé) na Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras – MG, Brasil, com altitude média de 975 metros. Foram utilizados frutos da safra 2016/2017, da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Topázio MG 190.

#### **3.2 Colheita e pré-processamento**

Os frutos de café no estágio de maturação cereja foram colhidos manualmente. 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 são constituídas somente por frutos maduros. Os frutos maduros selecionados foram descascados mecanicamente (processamento via úmida).

Todos os procedimentos de colheita e processamento foram realizados segundo Borém (2014).

#### **3.3 Determinação do teor de água**

O teor de água do café em pergaminho no início da secagem foi determinado utilizando-se o método padrão de estufa,  $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial do café em pergaminho e, o acompanhamento da secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa) até atingir o teor de água desejado, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g, de acordo com a equação 1.

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

Em que,

- $M_t$ : Teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca<sup>-1</sup> (bs));
- $m_{ai}$ : 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).

### 3.4 Sistema de secagem

Depois do processamento, os grãos foram secados à temperatura de 40 °C em estufa a vácuo (SOLAB, SL-104/40, Piracicaba, São Paulo) nas seguintes pressões absolutas: 147, 447 e 747 mmHg, sendo a pressão atmosférica local de 747 mmHg, até que atingissem 11 kg de água 100 kg de massa total<sup>-1</sup>. A escolha das pressões utilizadas foi baseada na capacidade máxima de pressão de vácuo da bomba, na pressão média de vácuo e na pressão atmosférica. A cada pesagem houve renovação do ar interno, em razão da abertura da estufa e retirada da água condensada em seu interior.

Dentro da estufa, os frutos foram distribuídos em quatro placas de *petri*, com rodizio das placas em cada pesagem.

Durante a secagem, as amostras de frutos de café foram pesadas em intervalos de tempos para determinação da cinética de secagem. Depois da secagem, as amostras foram mantidas sem beneficiamento e armazenadas em condições controladas à temperatura de 10°C e 50% de umidade relativa, por 30 dias e, posteriormente, foram realizadas as análises fisiológicas.

A temperatura utilizada neste trabalho, 40°C, é recorrente em publicações de secagem a vácuo (ORIKASA et al., 2014) e secagem para café com ar aquecido. Segundos estudos prévios (ALVES et al., 2013; OLIVEIRA, 2015), é uma temperatura que não causa degradação na membrana celular dos grãos.

A razão de umidade ( $M_r$ ) foi calculada pela equação 2. Para todas as condições testadas, os valores de  $M_r$  em função do tempo de secagem foram ajustados para descrever a cinética de secagem dos cafés em pergaminho.

$$M_r = \frac{M_t - M_{req}}{M_0 - M_{req}} \quad (2)$$

Onde:

- $M_r$ : Razão de umidade (adimensional);
- $M_t$ : Teor de água do produto no tempo t (decimal, (bs));
- $M_{req}$ : Teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs));
- $M_0$ : Teor de água inicial do produto (decimal, (bs)).

O teor de água de equilíbrio higroscópico foi calculado pela equação 3, para o café descascado (AFONSO JUNIOR, 2001):

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

Onde:

- $M_{req}$ : Teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs));  
 T : Temperatura do ar de secagem (°C);  
 UR : Umidade relativa do ar de secagem, (decimal).

Embora tal equação não tenha sido obtida para a secagem a vácuo, considera-se que seu uso não incida em erros relevantes.

### 3.5 Cinética de secagem

A cinética de secagem foi matematicamente modelada, conforme os modelos, utilizados em sistemas de secagem convencionais, apresentados na Tabela 1, equações de 4 a 12.

O ajuste dos modelos matemáticos foi realizado com a análise de regressão não linear pelo método Quasi-Newton, utilizando o software STATISTICA 8.0® (STATSOFT, 2004).

Para verificar o grau de ajuste de cada modelo, utilizou-se o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (REQM) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ) representados pelas equações 13, 14 e 15:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{r\text{pred},i} - M_r)^2}{\sum_{i=1}^n (M_{r\text{pred},i} - M_r)^2} \quad (13)$$

$$\text{REQM} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{r\text{exp},i} - M_{r\text{pred},i})^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$\chi^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (M_{r\text{exp},i} - M_{r\text{pred},i})^2}{(N-n)} \right] \quad (15)$$

### 3.6 Análises fisiológicas

Foram realizadas análises fisiológicas das amostras de café para verificar a qualidade fisiológica dos grãos depois da secagem a vácuo. Tais análises estão descritas a seguir.

#### 3.6.1 Teste de germinação

Quatro repetições de 25 grãos sem a presença dos pergaminhos foram colocados para germinar em folhas de papel do tipo germitest, umedecidas com água em quantidade igual a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os grãos foram mantidos em germinador, regulado à temperatura de 30°C, a primeira contagem foi realizada no 15º dia (protrusão radicular) e a avaliação realizada no 30º dia, segundo as prescrições das Regras para análises de sementes (BRASIL, 2009).

Figura 3 - Representação de uma repetição do teste de germinação.



Fonte: Da autora (2017).

Figura 4 - Amostra com as quatro repetições.



Fonte: Da autora (2017).

Figura 5 - Amostra pronta para ser encaminhada ao germinador.



Fonte: Da autora (2017).

### 3.6.2 Condutividade elétrica

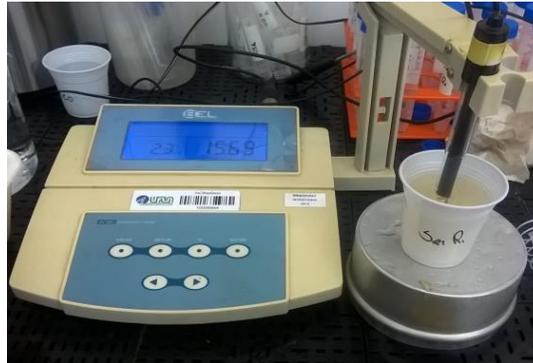
O teste foi realizado com duas repetições de 50 grãos, sem pergaminho, por tratamento. Os grãos foram pesados em balança com precisão de 0,001 g; imersos em 75 mL de água deionizada no interior de copos plásticos com capacidade para 180 mL, mantidas em incubadora BOD com ventilação forçada regulada a 25°C, durante cinco horas, segundo metodologia proposta por Malta, Pereira e Chagas (2005). Depois do período de embebição, os resultados da condutividade elétrica das soluções foram anotados. A condutividade elétrica foi medida, utilizando-se condutivímetro digital de bancada microprocessado para soluções aquosas BEL modelo W 12D. Os resultados foram expressos em  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  calculados pela equação 16:

$$CE = \frac{(CE \text{ solução} - CE \text{ água})}{\text{massa (g)}} \quad (16)$$

Onde:

CE: condutividade elétrica, em  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$

Figura 6 - Teste de condutividade elétrica.



Fonte: Da autora (2017).

### 3.6.3 Lixiviação de potássio

A leitura da lixiviação de potássio foi realizada imediatamente depois da realização do teste de condutividade elétrica, segundo metodologia proposta por Prete (1992). Em um fotômetro de chama (Digimed NK-2002), as leituras das soluções do teste de condutividade elétrica foram realizadas, medindo-se a quantidade de potássio lixiviado. A diluição utilizada para a realização do teste foi de 1:10 (uma parte de solução para nove partes de água destilada). Com os dados obtidos, foi calculada a quantidade de potássio lixiviado, expressando-se os resultados em partes por milhão (ppm), por meio da equação 17:

$$LK = \frac{\text{Leitura} \left(\frac{mg}{L}\right) * \text{Diluição (1:10)} * 1,56}{\text{massa (g)}} \quad (17)$$

Onde:

LK = íons de potássio lixiviados, em ppm g<sup>-1</sup>.

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

Foram utilizados em média quatro fragmentos do endosperma do café, cortados longitudinalmente, por tratamento. Os fragmentos foram colocados em tubos Eppendorf de 1,5 mL imersos em solução fixativa (Karnovsky modificado), pH 7,2 e armazenados em câmara fria, por no mínimo 24 h. Após essa etapa, as amostras foram lavadas em solução tampão cacodilato 0,05M (três vezes de 10 min para retirar os resíduos de glutaraldeído que podem reduzir o tetróxido de ósmio), posteriormente transferidos para uma solução de tetróxido de ósmio 1% (3 gotas) e água para cobri-las por uma hora, foram lavados três vezes em água destilada e, posteriormente, desidratado em série de acetona (25, 50, 75, 90 e 100%, sendo essa última concentração repetida por três vezes) e, depois, levados para o aparelho de 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, uma imagem para cada tratamento, nas condições de trabalho de 20 kV e distância de trabalho entre 7 e 15 mm. As imagens geradas foram gravadas e abertas no Software Photopaint do pacote Corel Draw 12, onde foram selecionadas e preparadas. Com base nas imagens geradas, pode-se observar o preenchimento dos espaços intracelulares, o extravasamento do lúmen celular e a formação dos pontos em forma de gotas, para caracterizar o efeito da secagem utilizada.

#### **4 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO**

Foi realizada a análise de componentes principais (PCA) para correlações dos resultados das diferentes variáveis. Primeiramente, realizou-se a padronização dos dados (média igual a 0 e variância igual a 1). Com isso, foram colocados os dados, na mesma escala de variação, já que as características foram medidas em escalas distintas.

Foi utilizado o software Chemoface para tratar os resultados (NUNES et al., 2012).

O ajuste dos modelos matemáticos foi realizado com a análise de regressão não linear pelo método Quasi-Newton, utilizando o software STATISTICA 8.0® .



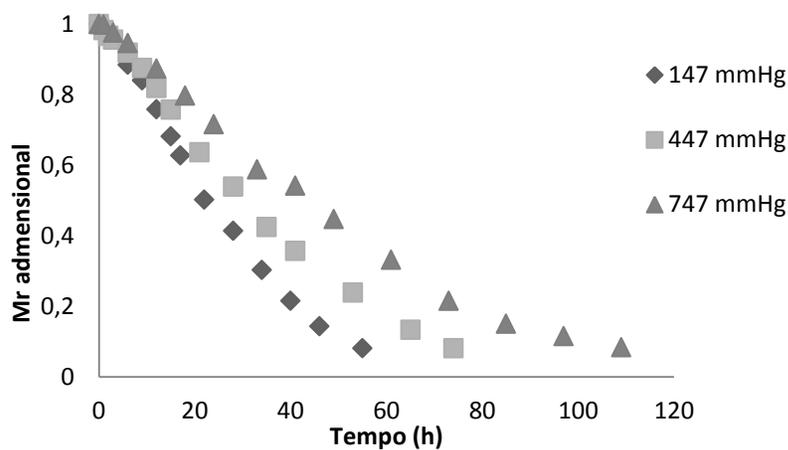
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Cinética de secagem

As amostras *in natura* dos frutos de café apresentaram teor de água de  $61,38 \pm 0,8$  kg de água 100 kg de amostra. Os grãos depois da secagem em estufa apresentaram teor de água de  $11,33 \pm 0,01$  kg de água 100 kg de material<sup>1</sup>.

Na Figura 1, apresentam-se as curvas de secagem dos grãos de café submetidos às pressões absolutas 147, 447 e 747 mmHg e temperatura do ar de secagem de 40°C, em função da razão de umidade ( $M_r$ ) com o tempo.

Figura 7 - Cinética de secagem de grãos de café utilizando temperatura do ar de 40°C.



Fonte: Da autora (2017).

A diminuição da pressão absoluta proporcionou o aumento da taxa de secagem e, conseqüentemente, diminuição do tempo de secagem. Os tempos gastos para secagem foram de 55, 74 e 109 horas para as pressões absolutas de 147, 447 e 747 mmHg (pressão atmosférica local de 747 mmHg). Interessante notar que a redução no tempo de secagem foi de até 32% a uma pressão que

corresponde a 60% da pressão local e de até 50% a uma pressão de aproximadamente 20% da pressão local.

A redução do tempo de secagem quando utilizado o vácuo também foi observada por Kayacan, Sagdic e Doymaz (2018) quando realizaram a secagem de pólen de abelha. Compararam a secagem a vácuo com a secagem por ar quente e a redução do tempo na secagem a vácuo foi significativamente maior. Esse fato também foi observado por Horecki et al. (2018), quando compararam a liofilização com a secagem a vácuo de Cornelian cherries.

O uso de pressões reduzidas possibilita a diminuição do tempo de secagem em decorrência da redução do diferencial de pressão ambiente e a pressão de vapor de água (LEE; KIM, 2009).

Como a secagem é uma operação com alto custo energético, reduções no tempo de secagem podem significar redução no custo final do produto.

### **5.1.1 Modelagem da cinética de secagem**

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados dos parâmetros de ajustes dos 9 modelos aos dados experimentais, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e o qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste dos modelos da cinética de secagem de café cereja descascado e valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

(continua)

Modelo	Pressão [mmHg]	$k \times 10^3$	n	a	b	c	$R^2(\%)$	REQM $\times 10^2$	$\chi^2 \times 10^3$
Aproximação por difusão	147	1,06	-	5,15	1,21	-	99,88	1,08	0,15
	447	0,21	-	5,00	0,83	-	99,09	3,00	1,13
	747	0,14	-	4,94	0,79	-	99,3	2,78	0,96
Dois termos exponencial	147	0,88	-	1,95	-	-	99,85	1,22	0,17
	447	0,64	-	1,88	-	-	99,87	1,10	0,14
	747	0,46	-	1,90	-	-	99,77	1,57	0,03
Henderson e Pabis	147	0,59	-	1,07	-	-	97,96	4,53	0,24
	447	0,43	-	1,05	-	-	98,41	3,99	1,83
	747	0,32	-	1,05	-	-	98,39	4,20	2,04
Logaritmo	147	0,38	-	1,35	-	-0,30	99,43	2,38	0,71
	447	0,14	-	2,19	-	-1,18	99,27	2,68	0,90
	747	0,11	-	1,93	-	-0,92	99,25	2,87	1,03

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste dos modelos da cinética de secagem de café cereja descascado e valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

(conclusão)

Modelo	Pressão [mmHg]	k x 10 <sup>3</sup>	n	a	b	c	R <sup>2</sup> (%)	REQMx10 <sup>2</sup>	$\chi^2$ x10 <sup>3</sup>
Midilli	147	0,62	0,93	1,04	-8x10 <sup>-5</sup>	-	99,43	2,38	0,78
	447	0,19	1,06	1,02	-3x10 <sup>-5</sup>	-	99,73	1,62	0,36
	747	0,61	0,86	1,04	-4x10 <sup>-5</sup>	-	99,3	2,77	1,04
Newton	147	0,50	-	-	-	-	96,48	5,95	3,80
	447	0,40	-	-	-	-	97,68	4,81	2,48
	747	0,03	-	-	-	-	97,70	5,04	2,72
Page modificado	147	0,57	1,41	-	-	-	99,91	0,92	0,098
	447	0,42	1,34	-	-	-	99,90	0,97	0,11
	747	0,42	1,34	-	-	-	99,90	0,97	0,11
Page	147	0,01	1,50	-	-	-	99,02	3,14	1,14
	447	0,01	1,55	-	-	-	99,23	2,77	0,88
	747	0,01	1,55	-	-	-	99,23	2,77	0,88
Wang Singh	147	-	-	-4,01x10 <sup>-4</sup>	3,4x10 <sup>-8</sup>	-	99,41	2,42	0,68
	447	-	-	-3,1 x10 <sup>-4</sup>	2,3 x10 <sup>-8</sup>	-	98,09	1,75	0,35
	747	-	-	-3,1 x10 <sup>-4</sup>	1,3 x10 <sup>-8</sup>	-	98,09	1,75	0,35

Fonte: Da autora (2017).

Analisando os valores obtidos referentes ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e o qui-quadrado ( $\chi^2$ ), observa-se que o modelo Page Modificado é o que apresenta melhor ajuste aos dados experimentais de secagem, com  $R^2 > 0,99$ , REQM abaixo de 0.01 e  $\chi^2$  abaixo de  $1,1 \times 10^{-3}$  permitindo sua utilização na predição da cinética de secagem a vácuo de café cereja descascado. Porém, todos os outros modelos tiveram um bom ajuste, podendo também ser utilizados para essa condição de secagem.

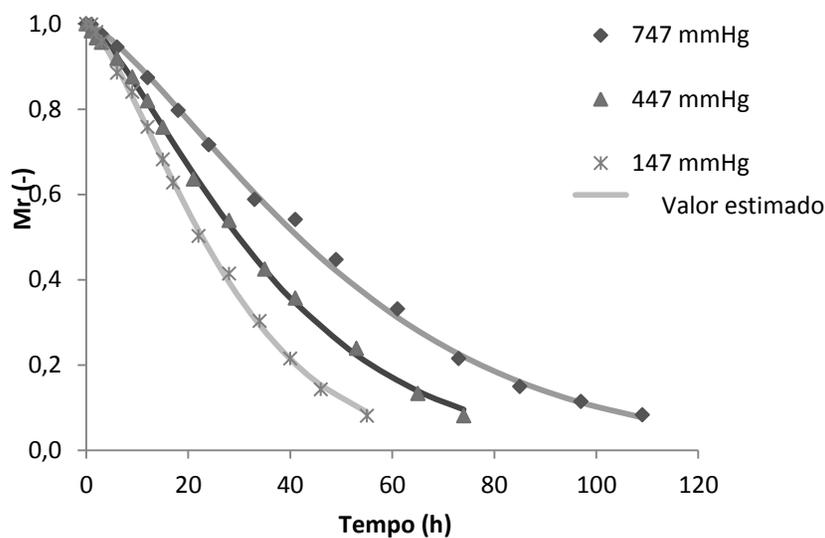
Siqueira et al. (2017) observaram que modelos empíricos podem ser utilizados para a predição de cinética de secagem de café e que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou para a secagem de café, os autores também observaram para aquelas condições que houve um aumento da taxa de secagem à temperatura do ar de 40°C.

O modelo de Page Modificado foi o que melhor se ajustou à secagem a vácuo de café cereja descascado. Esse modelo também foi selecionado para prever o comportamento de outros produtos como capim limão (MARTINAZZO et al., 2010), abacaxi (WAUGHON; PENA, 2009), pimenta de cheiro (PONTES et al., 2009), bagaço de uva (FERREIRA et al., 2012), bagaço de laranja (FIORENTIN et al., 2012), dentre outros.

Para a representação gráfica das curvas de secagem (Figura 2), utilizou-se o modelo de Page Modificado por apresentar menor número de coeficientes comparados aos demais modelos e principalmente por obter melhor resultado.

Verifica-se, na Figura 2, pela correspondência entre os valores experimentais e estimados, ajuste satisfatório para a descrição da secagem de café cereja descascado.

Figura 8 - Valores experimentais da razão de umidade ( $M_r$ ) observado e estimado pelo modelo de Page Modificado para a secagem de grãos de café utilizando a temperatura do ar de 40°C.



Fonte: Da autora (2017).

## 5.2 Análises fisiológicas

A metodologia de componentes principais é um tipo de análise multivariada que auxilia a melhor compreensão das características investigadas, principalmente, quando são avaliadas características de diferentes unidades (BRO; SMILDE, 2014; JOLLIFFE; CADIMA, 2016). Aliada a essa metodologia, os gráficos do tipo biplot permitem explorar a informação dos tratamentos e das variáveis, simultaneamente, retornando representações gráficas que facilitam, sobremaneira, a interpretação dos resultados.

Na representação gráfica, cada eixo do biplot se refere a um componente principal que explica uma porcentagem da variação total entre os tratamentos. Os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) do biplot referente às

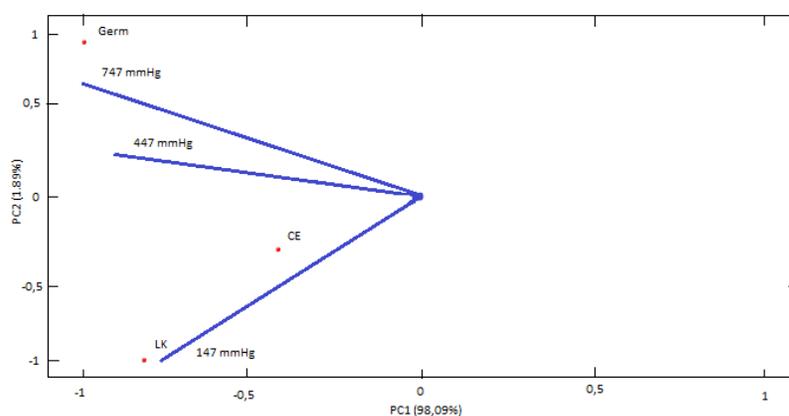
pressões (Figura 3) explicaram 99,98% da variabilidade apresentada pelos tratamentos para Germinação (Germ), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK). O segundo componente principal (PC2) foi suficiente para explicar grande parte da variação para Germ, CE e LK.

Observaram-se um distanciamento dos três vetores apresentados, sendo a distância para LK a maior.

De acordo com Bro e Smilde (2014), quanto menor o ângulo entre os vetores maior a correlação entre essas características. Já a interação entre os tratamentos foi representada pelas iniciais de cada tratamento, de forma que quanto mais próximo um tratamento do outro maior a similaridade entre eles para as características estudadas.

Assim, observou-se maior similaridade entre as pressões absolutas 747 e 447 mmHg e a característica Germ explicou grande parte dessa similaridade. A característica LK mostrou alta correlação com a pressão absoluta 147 mmHg, e a característica CE mostrou-se indiferente aos tratamentos (Figura 3).

Figura 9 - Biplot dos componentes principais (PC1 e PC2) para as características germinação (Germ), condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) dos tratamentos (pressões absolutas) 147, 447 e 747 mmHg.

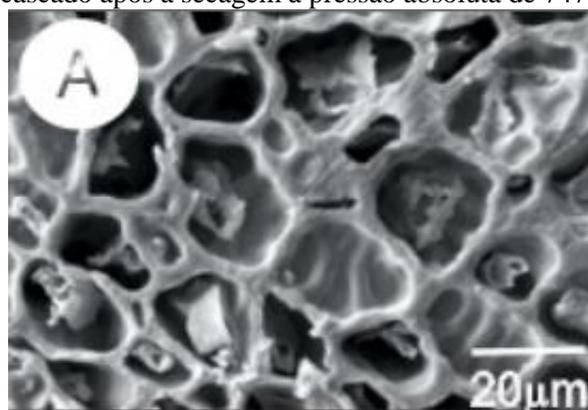


Fonte: Da autora (2017).

### 5.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As alterações provocadas pelos efeitos de secagem nas estruturas da membrana celular do endosperma do café e, observadas nas imagens digitais estão apresentados na sequência. Os resultados das análises do endosperma de café descascado depois da secagem são apresentados nas Figuras 4, 5 e 6.

Figura 9 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café (A) cereja descascado após a secagem à pressão absoluta de 747 mmHg.



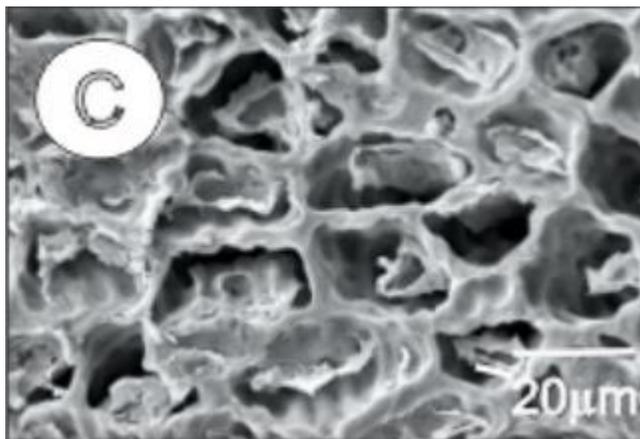
Fonte: Da autora (2017).

Figura 10 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café (B) cereja descascado após a secagem à pressão absoluta de 447 mmHg.



Fonte: Da autora (2017).

Figura 11 - Eletromicrografia de varredura do endosperma do café (C) cereja descascado após a secagem à pressão absoluta de 147 mmHg.



Fonte: Da autora (2017).

As pressões absolutas de secagem tiveram interferência na resistência e predisposição estrutural da parede celular do endosperma. A degradação da membrana celular é mais acentuada com a diminuição da pressão. Porém, manteve-se íntegra a parede celular com os espaços intercelulares vazios. O mesmo foi verificado por Saath et al. (2010) em secagem convectiva de café despulpado com temperatura do ar de secagem de 40°C. Naquele trabalho, a secagem de cafés em pergaminho à temperatura de 40°C não causou nenhum dano ao citoplasma das células. Porém, com o aumento da temperatura para 60°C, observou-se comprometimento nas estruturas celulares dos grãos.

A diferença entre as secagens pode ser associada à pressão à qual os frutos de café cereja descascado foram submetidos. Verifica-se que, com isso, a secagem a vácuo transcorreu em condições seguras, preservando a integridade das células de acordo com os resultados (MARQUES, 2006; SAATH et al., 2010).

Em um estudo sobre diferentes métodos de secagem e extração de óleo de linhaça com secagem a vácuo, observada por eletromicrografias, apresentou

pequena contração na parede celular das células, porém, manteve a integridade da mesma (ZHANG; LIU; CHE, 2018).

## 6 CONCLUSÕES

- a) Há efeito do vácuo na secagem de cafés cereja descascado;
- b) O uso do vácuo reduziu em até 50% o tempo de secagem;
- c) A qualidade fisiológica dos grãos submetidos à pressão absoluta de 447 mmHg foi mantida, assim como na utilização da pressão local (747 mmHg);
- d) O modelo Page Modificado foi o que melhor se ajustou as curvas de secagem.



## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho pode ser considerado introdutório na análise da secagem de café em pressões reduzidas. Porém, ele sugere uma maior investigação com relação à influência do vácuo tanto com relação ao processo de secagem quanto em relação à qualidade do produto.



## REFERÊNCIAS

- ABALONE, R. et al. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, London, v. 93, n. 2, p. 179-188, 2006.
- ABREU, G. F. de. **Aspectos sensoriais, fisiológicos e bioquímicos de grãos de café armazenados em ambiente refrigerado**. 2015. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- 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.
- 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 Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- ALVES, G. E. et al. Condutividade elétrica e lixiviação de potássio de cafés cereja despolpado submetido ao parcelamento da secagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 37., 2007, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas, 2007. 1 CD-ROM.
- ALVES, G. E. et al. Drying kinetics of natural coffee for different temperatures and low relative humidity. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, p. 226-236, 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. **Engvista**, Niterói, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.

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.

AVENTURAS DA BARISTA. **O fruto do café e a origem do café moca**. 2015. Disponível em: <<https://aventurasdabarista.wordpress.com/2015/08/19/o-fruto-do-cafe-e-a-origem-do-cafe-moca/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

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.

BAER, W. **A economia brasileira**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 2002.

BORÉM, F. M. **Handbook of coffee post-harvest technology**. Georgia: Gin Press, 2014.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. v. 1.

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. et al. Effect of intermittent drying and storage on parchment coffee quality efeito da secagem intermitente e do armazenamento. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 2, p. 609-616, 2014.

BORÉM, F. M. et al. Microscopia eletrônica de varredura de grãos de café submetidos a diferentes formas de processamento e secagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 227-237, 2013.

BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, London, v. 99, n. 1, p. 62-66, 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.

BORGES, S. V. et al. Drying kinetics of bananas by natural convection: influence of temperature, shape, blanching and cultivar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 368-376, mar./abr. 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009. v. 1.

BRAZILIAN SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION CAFÉS ESPECIAIS. **Sobre a BSCA**. Disponível em: <<http://bsca.com.br/index/home>>. Acesso em: 11 fev. 2018.

BRO, R.; SMILDE, A. K. Principal component analysis. **Analytical Methods**, London, v. 6, n. 9, p. 2812-2831, 2014.

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.

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.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café: monitoramento agrícola, safra 2017**, v. 5, n. 1. Rio de Janeiro, 2018. 98 p.

CORADI, P. C. et al. Effect of drying and storage conditions on the quality of natural and washed coffee. **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 38-47, 2007.

CORRÊA, P. C. et al. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 33, n. 4, p. 575-581, 2011.

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, 2010.

CORRÊA, P. C.; QUEIROZ, D. M.; AFONSO JUNIOR, P. C. Equilibrium moisture content for natural coffee and parchment coffee. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2001, Saint Joseph. **Proceedings...** Saint Joseph, 2001. p. 23.

DEBS-LOUKA, E. et al. Deshydratation de la carotte (*Daucus carota* L.) effet d'un nouveau procédé sur les composés 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.

DOYMAZ, I. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 79, p. 243-249, 2007.

FANTE, C. et al. Drying of plums (*Prunus* sp, c.v Gulfblaze) treated with KCl in the field and subjected to pulsed vacuum osmotic dehydration. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v. 46, n. 5, p. 1080-1085, 2011.

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.

FERNANDO, W. J. N.; THANGAVEL, T. Vacuum drying characteristics of coconut. **Drying Technology**, New York, v. 5, n. 3, p. 363-372, 1987.

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.

FERREIRA, L. F. D. et al. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 6, p. 855-862, jun. 2012.

FIGUEIRA, F. V. et al. Estudo da secagem de Pequi (*Caryocar brasiliensis* Camb.) precedida de desidratação osmótica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2014. 1 CD-ROM.

FIorentin, L. D. et al. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **Engevista**, Niterói, v. 14, n. 1, p. 22-33, 2012.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 17, n. 6, p. 1167-1168, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, n. 3, 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.

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.

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

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v. 374, n. 2065, 2016. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26953178>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

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: 10 mar. 2017.

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.

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.

KRZYŻANOWSKI, F. C.; WEST, S. H.; FRANÇA NETO, J. de B. Drying soybean seed using air ambient temperature at low relative humidity. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 28, n. 6, p. 1-5, 2006.

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.

LIVRAMENTO, K. G. do et al. Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying process. **Food Chemistry**, London, v. 221, n. 5, p. 1874-1882, 2017.

MALCZEWSKIKAMINSKI, J.; KACZMAREK, W. Vacuum contact drying of seeds. **Drying Technology**, New York, v. 7, n. 1, p. 59-69, 1989.

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.

MALTA, M. R.; PEREIRA, R. G. F. A.; CHAGAS, S. J. de R. Condutividade elétrica e lixiviação de potássio do exsudato de grãos de café: alguns fatores que podem influenciar essas avaliações. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, p. 1015-1020, 2005.

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.

MARTINAZZO, A. P. et al. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim limão [*Cymbopogon citratus*]. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 488-498, 2010.

MCDONALD, M. B. Seed deterioration: physiology, repair and assessment. **Seed Science and Technology**, Bassersdorf, v. 27, n. 1, p. 177-237, 1999.

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.

NASTAJ, J. F. A mathematical model for the continuous vacuum drying of highly viscous foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v. 7, p. 47-58, 1989.

NUNES, C. A. et al. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 23, n. 11, p. 2003-2010, 2012.

OLIVEIRA, G. **Incidência de fungos do gênero *Aspergillus* Seção *Circumdati* e *Nigri* em grãos de café cultivados em Minas Gerais e o efeito in vitro de fatores abióticos no crescimento e na biossíntese de ocratoxina A**. 2016. 97 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

OLIVEIRA, G. H. H. de 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, 2010.

OLIVEIRA, P. D. de. **Aspectos ultraestruturais e fisiológicos associados à qualidade da bebida de café arábica submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

OLIVEIRA, P. D. de. **Qualidade e alterações estruturais do café arábica submetido a alternância da temperatura na secagem**. 2015. 135 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2015.

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.

ONDIER, G. O.; SIEBENMORGEN, T. J.; MAUROMOUSTAKOS, A. Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 100, n. 3, p. 545-550, 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.

ÖZDEMIR, M.; ONUR DEVRES, Y. Thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 42, n. 4, p. 225-233, 1999.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer**. Indiana: Purdue University, 1949.

PARDO, E. et al. Modelling of effects of water activity and temperature on germination and growth of ochratoxigenic isolates of *Aspergillus ochraceus* on a green coffee-based medium. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 98, n. 1, p. 1-9, 2005.

PONTES, S. F. O. et al. Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro (*Capsicum chinense*) a diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 143-148, 2009.

PRETE, C. E. C. **Condutividade elétrica do exsudado de grãos de café (*Coffea arabica* L.) e sua relação com a qualidade da bebida.** 1992. 125 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1992.

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. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 247-255, 2010.

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.

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, 2012.

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, p. 196-203, 2010.

SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, Essex, 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 ficus indica*). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 11, n. 1, p. 1-6, 2016.

SIQUEIRA, V. C. et al. Drying kinetics of processed natural coffee with. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 400-409, 2017.

SOUSA, K. A. de et al. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) the drying kinetics of forage turnips (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SPONCHIADO, J. C.; SOUZA, C. A.; COELHO, C. M. M. Teste de condutividade elétrica para determinação do potencial fisiológico de sementes de aveia branca. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 4, p. 2405-2414, jan. 2014.

STATSOFT. **Statistica for Windows**: software system for data-analyses. Version 8.0. Tulsa, 2004.

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.

TOSTA, M. F. **Bioquímica e sensorial de cafés naturais e desmucilados, produzidos em diferentes altitudes**. 2014. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

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.

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

WAUGHON, T. G. M.; PENA, R. da S. Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 27, n. 2, p. 257-270, 2009.

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

ZHANG, Z.; LIU, Y.; CHE, L. Effects of different drying methods on the extraction rate and qualities of oils from demucilaged flaxseed. **Drying Technology**, New York, v. 5, n. 3, p. 1-11, 2018.