



**RODRIGO VICTOR MOREIRA**

**SECAGEM DE CAFÉS DESCASCADOS  
SUBMETIDOS A DIFERENTES UMIDADES  
RELATIVAS DO AR DE SECAGEM APÓS MEIA  
SECA**

**LAVRAS – MG  
2019**

**RODRIGO VICTOR MOREIRA**

**SECAGEM DE CAFÉS DESCASCADOS SUBMETIDOS A  
DIFERENTES UMIDADES RELATIVAS DO AR DE SECAGEM APÓS  
MEIA SECA**

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.

Orientador  
Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

**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).**

Moreira, Rodrigo Victor.

Secagem de cafés descascados submetidos a diferentes  
umidades relativas do ar de secagem após meia seca / Rodrigo  
Victor Moreira. - 2019.

124 p. : il.

Orientador(a): Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

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

1. Coffea arabica L. 2. Qualidade. 3. Secagem. I. Corrêa,  
Jefferson Luiz Gomes. II. Título.

**RODRIGO VICTOR MOREIRA**

**SECAGEM DE CAFÉS DESCASCADOS SUBMETIDOS A  
DIFERENTES UMIDADES RELATIVAS DO AR DE SECAGEM APÓS  
MEIA SECA**

**DRYING OF PEELED COFFEES SUBMITTED THE DIFFERENT  
RELATIVE HUMIDITY OF THE DRYING AIR AFTER PARTIAL  
DRYING**

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 25 de fevereiro de 2019.

Dr. Ednilton Tavares de Andrade	UFLA
Dra. Letícia Fernandes de Oliveira	UFSJ
Dr. Marcelo Ângelo Cirillo	UFLA
Dr. Roney Alves da Rocha	UFLA

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa  
(Orientador)

**LAVRAS – MG  
2019**

*Aos meus pais, Antônio Donizetti Moreira e Tereza de Nazaré Moreira,  
pelo apoio, incentivo e força para minha formação.*

*Aos demais familiares e amigos.*

***DEDICO***

*A Deus,*

***OFEREÇO***

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Antônio e Tereza, pela batalha constante pela minha educação.

A minha namorada, Camila, pelo amor, companheirismo, incentivo e presença constante, que foi fundamental nos últimos anos.

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 realização do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa, que me orientou, sendo indispensável durante o doutorado, permitindo que fosse realizado.

Ao professor Dr. Roney Alves da Rocha, pelo acolhimento, oportunidade, colaboração, amizade, dedicação e ensinamentos, que foram de grande relevância.

Aos professores Dr. Ednilton Tavares de Andrade, Dra. Letícia Fernandes de Oliveira e Dr. Marcelo Ângelo Cirillo, pela disponibilidade, contribuição e sugestões.

Ao Sr. Victor Pedroso, pela disponibilização do café utilizado.

À equipe e amigos do Laboratório de Engenharia de Alimentos- UFLA.

Ao Departamento de Ciência dos Alimentos- UFLA.

À equipe do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural- UFLA.

À equipe e amigos do Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas- UFLA.

## RESUMO

A secagem é um dos principais fatores que influenciam a qualidade final da bebida café e apesar de ser uma operação de rotina, fatores como a exposição do produto a altas temperaturas podem causar danos na qualidade. Neste sentido, o uso de baixas umidades relativas do ar de secagem se tornou uma boa alternativa, por combinar menores temperaturas com maiores velocidades de secagem. Assim, o objetivo desse trabalho foi estudar a influência que diferentes umidades relativas do ar de secagem após meia seca têm sobre a cinética de secagem e qualidade dos cafés descascados. A colheita seletiva dos frutos de café cereja (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho) foi realizada em Nepomuceno-MG, sendo posteriormente encaminhados a Universidade Federal de Lavras, onde foram realizadas a separação por densidade, o processamento por via úmida, resultando na porção de café descascado e a secagem dos grãos. Foram realizados onze tratamentos de secagem, sendo nove resultados da combinação de três temperaturas de bulbo seco (40 °C-40 °C; 40 °C-35 °C e 35 °C-35 °C) e três temperaturas de ponto de orvalho (2,6 °C; 10,8 °C e 16,2 °C), mais dois tratamentos sem o controle da temperatura de ponto de orvalho, secados a 40 °C-40 °C e 35 °C-35 °C cada. O controle da umidade relativa por meio da temperatura de ponto de orvalho foi feito apenas após os grãos alcançarem o teor de água de 0,428 b.s.. Os modelos de Aproximação da Difusão e Midilli Modificado foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais referentes a primeira e segunda parte de secagem respectivamente. O coeficiente de difusividade efetivo da água em grãos de café variou de  $0,81 \times 10^{-11}$  a  $1,84 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  durante a primeira parte da secagem e variou de  $1,49 \times 10^{-11}$  a  $3,29 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  durante a segunda parte da secagem, aumentando significativamente com a redução da temperatura de ponto de orvalho e aumento da temperatura de bulbo seco. Para uma mesma temperatura de bulbo seco, a redução da temperatura de ponto de orvalho e consequentemente a umidade relativa, aumenta a taxa de redução de água e reduz o tempo de secagem dos grãos de café. Cafés submetidos a secagem com temperatura de 40 °C e temperatura de ponto de orvalho de 16,2 °C (UR de 25%) são indicados para produção de cafés de maior qualidade em menores tempos. Devido as características climáticas de cada região e visando maior qualidade, indica-se temperaturas de secagem de 35 °C para o Cerrado Mineiro e 40 °C-35 °C para Sul de Minas. Para região de Matas de Minas, a combinação de temperatura de secagem de 40 °C-35 °C não é indicada para se obter cafés de melhor qualidade. Temperatura de ponto de orvalho de 16,2 °C (UR de 25%), resultam em cafés com

maior integridade celular quando expostos a temperaturas de 40 °C. Para região Sul de Minas, a temperatura de secagem combinada de 40 °C-35 °C, mantém a estrutura celular preservada.

**Palavras-chave:** *Coffea arabica* L., qualidade, secagem, umidade relativa do ar, temperatura de ponto de orvalho.

## ABSTRACT

Drying is one of the main influencing factors on the final quality of the drink coffee and although to be an operation of routine, factors as the exposition of the product the high temperatures can cause damages in the quality. Thus, the use of low relative humidity of the drying air if became a good alternative, by combining minors temperatures with bigger speeds of drying. The objective of this work was to study the influence that different relative humidity of the drying air after partial drying it has on drying of kinetic and quality of the peeled coffees. The selective harvest of the fruits of Arabica coffee (*Coffea Arabica* L.) was accomplished in Nepomuceno-MG, being later directed the Federal University of Lavras, where was accomplished the separation for density, the processing by wet, resulting in the portion of peeled coffee and the drying of the grains. Eleven treatments of drying were accomplished, being nine results of the combination of three dry bulb temperatures (40 °C-40 °C; 40 °C-35 °C and 35 °C-35 °C) and three dew point temperatures (2,6 °C; 10,8 °C and 16,2 °C), more two treatments without the control of the dew point temperatures, dried to 40 °C-40 °C and 35 °C-35 °C each. The control of the relative humidity by means of the dew point temperature was made after the grains reach the moisture contents of 0,428 b.s.. The models of Approach of Difusão and Modified Midilli were the most adequate for describing the drying process of the first one and second part of drying respectively. The effective diffusivity coefficient of water in coffee grains varied of  $0,81 \times 10^{-11}$  the  $1,84 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  during the first part of the drying and varied of  $1,49 \times 10^{-11}$  the  $3,29 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  during the second part of the drying, increasing significantly with the reduction of the dew point temperature and increase of the dry bulb temperature. For same one dry bulb temperature, the reduction of the dew point temperature and consequently the relative humidity, increases the drying rate and reduced drying time of the coffee grains. Submitted coffees the drying with dry bulb temperature of 40 °C and dew point temperature of 16,2 °C (RH of 25%) are indicated for production of coffees of bigger quality in smaller times. According the climatic characteristics of each region and aiming at bigger quality, indicates drying temperatures of 35 °C for the “Cerrado Mineiro” and 40 °C-35 °C for “Sul de Minas”. For region of “Matas de Minas”, the combination of drying temperature of 40 °C-35 °C is not indicated for production of coffees from better quality. Dew point temperature of 16,2 °C (UR of 25%), results in coffees with bigger cellular integrity when exposed the temperatures of to 40 °C. For region

“Sul de Minas”, the drying temperature agreed of 40 °C-35 °C, keeps the preserved cellular structure.

**Keywords:** *Coffea arabica* L., Quality, Drying, Relative humidity of air, Dew point temperature.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sistema de secagem utilizado para a secagem mecânica do café. Fonte: Alves (2013).....	51
Figura 2	Valores de razão de umidade observados durante a secagem do café descascado, em função do tempo. ....	61
Figura 3	Taxa de redução de água em função do tempo de secagem dos grãos de café descascado durante a primeira parte da secagem. (A) Durante toda a primeira parte de secagem; (B) Após as 2,5 primeiras horas de secagem. ....	68
Figura 4	Taxa de redução de água em função do teor de água para os grãos de café descascado: (A) durante toda a primeira parte; (B) de 0,8 b.s. até o final da primeira parte; (C) após meia seca (segunda parte). ....	70
Figura 5	Valores de razão de umidade (adimensional) observados e estimados pelo modelo de Aproximação da Difusão para primeira parte da secagem de grãos de café .....	78
Figura 6	Valores de razão de umidade (adimensional) observados e estimados pelo modelo de Midilli Modificado para a secagem de grãos de café após meia seca (segunda parte da secagem).....	79
Figura 7	Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Aproximação da Difusão para a primeira parte da secagem do café descascado, em função do tempo de secagem.....	82
Figura 8	Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli Modificado para segunda parte da secagem do café descascado, em função do tempo de secagem.....	83
Figura 9	Biplots para os dois primeiros componentes principais, dos quatro utilizados na discriminação dos tipos de secagem em relação as variáveis sensoriais e de secagem. F/A= fragrância/aroma; SA=	

	sabor; AC= acidez; CO= corpo; FL= finalização; EQ= equilíbrio; FI= final; TOT= nota total; $T_{po}$ = temperatura de ponto de orvalho; $T_{bsi}$ = temperatura de bulbo seco da primeira parte; $T_{bsf}$ = temperatura de bulbo seco da segunda parte.....	94
Figura 10	Eletrmicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a $T_{bs}$ de 40 °C-40 °C e $T_{po}$ de 2,6 °C. (B) é resultado da ampliação de (A). Setas vermelhas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas cor laranja indicam desestruturação da parede celular.....	98
Figura 11	Eletrmicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a $T_{bs}$ de 40 °C-40 °C e $T_{po}$ de 10,8 °C. Setas vermelhas indicam espaços intercelulares cheios e setas cor laranja indicam desestruturação da parede celular.....	99
Figura 12	Eletrmicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a $T_{bs}$ de 40 °C-40 °C e $T_{po}$ de 16,2 °C. Setas sem preenchimento indicam espaços intercelulares parcialmente cheios e setas preenchidas indicam espaços intercelulares vazios. ....	99
Figura 13	Eletrmicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a $T_{bs}$ de 40 °C-35 °C e $T_{po}$ de 10,8 °C. ....	101
Figura 14	Eletrmicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a $T_{bs}$ de 35 °C-35 °C e $T_{po}$ de 16,2 °C. ....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa do ar de secagem para meia seca e complementação da secagem. ....	49
Tabela 2	Modelos matemáticos usados para prever o fenômeno de secagem. ....	55
Tabela 3	Valores médios do teor de água e tempo de secagem dos cafés descascados em função da temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e temperatura de ponto de orvalho ( $T_{po}$ ). ....	63
Tabela 4	Tempo de secagem, valores médios e máximos de taxa de redução de água de café descascado em função da temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho. ....	66
Tabela 5	Parâmetros estatísticos obtidos para os modelos de secagem utilizados para descrever a cinética de secagem dos grãos de café, referente a primeira parte da secagem. ....	72
Tabela 6	Parâmetros estatísticos obtidos para os modelos de secagem utilizados para descrever a cinética de secagem dos grãos de café, durante a segunda parte da secagem (após meia seca). ....	74
Tabela 7	Coefficientes do modelo de Dois Termos ajustados aos dados observados da cinética de secagem durante toda a secagem dos grãos de café descascados. ....	80
Tabela 8	Coefficientes do modelo de Midilli modificado ajustados aos dados observados da cinética de secagem após meia seca (segunda parte da secagem) dos grãos de café descascados. ....	80
Tabela 9	Valores de raio equivalente ( $R_{eq}$ ) e coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ) dos grãos de café descascados, em função das combinações temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e temperatura de ponto de orvalho	

	(T <sub>po</sub> ) do ar de secagem, para primeira e segunda parte da secagem.....	85
Tabela 10	Aspectos sensoriais da bebida dos grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.....	88
Tabela 11	Notas totais dos grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.....	92
Tabela 12	Estimativas dos coeficientes utilizados no cálculo dos escores dos quatro primeiros componentes referente às variáveis secagem e sensorial.....	96
Tabela 13	Valores médios das coordenadas $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $C^*$ (saturação) e Hue (tonalidade), de grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.....	103
Tabela 14	Análise de correlação entre as variáveis de cor de grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.....	104

## LISTA DE SIGLAS

$\hat{Y}$	Valor calculado pelo modelo
a	Comprimento (m)
$a^*$	Coordenada $a^*$ (parâmetro de cor que varia do verde ao vermelho)
a, b, c, d, n	Coefficientes dos modelos
ABIC	Associação Brasileira da Indústria de Café
AC	Acidez
ACP	Análise por componentes principais
b	Largura (m)
$b^*$	Coordenada $b^*$ (parâmetro de cor que varia do azul ao amarelo)
b.s.	Base seca (kg kg <sup>-1</sup> )
b.u.	Base úmida (%)
BSCA	<i>Brazil Specialty Coffee Association</i>
c	Espessura (m)
C*	Croma (saturação- cor)
CECAFÉ	Conselho dos Exportadores de Café do Brasil
CO	Corpo
COB	Classificação Oficial Brasileira
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CV	Coefficiente de variação (%)
$D_{\text{eff}}$	Coefficiente de difusão efetivo (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
EQ	Equilíbrio
F/A	Fragrância/aroma
FI	Final
FL	Finalização
GLR	Graus de liberdade do modelo
Hue	Ângulo Hue (tonalidade- cor)

ICO	<i>International Coffee Organization</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
k, k <sub>0</sub> , k <sub>1</sub>	Constantes de secagem
L*	Coordenada L* (luminosidade- cor)
m <sub>ai</sub>	Massa de água inicial (kg)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
m <sub>ms</sub>	Massa de matéria seca (kg)
m <sub>ti</sub>	Massa total inicial (kg)
m <sub>tt</sub>	Massa total no tempo t (kg)
n	Número de termos
P	Erro médio relativo (%)
PC	Componente principal
pp	Primeira parte da secagem
R	Raio equivalente dos frutos de café (m)
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação (%)
RAS	Regra para Análise de Sementes
RU	Razão de umidade (adimensional)
SA	Sabor
SCA	<i>Specialty Coffee Association</i>
SE	Desvio padrão da estimativa (decimal)
sp	Segunda parte da secagem
t	Tempo
T	Temperatura do ar de secagem (°C)
T <sub>bs</sub>	Temperatura de bulbo seco (°C)
T <sub>bsf</sub>	Temperatura de bulbo seco final (°C)
T <sub>bsi</sub>	Temperatura de bulbo seco inicial (°C)
TOT	Nota total
T <sub>po</sub>	Temperatura de ponto de orvalho (°C)

TRA	Taxa de redução de água (kg de água . kg de matéria seca <sup>-1</sup> . h <sup>-1</sup> )
TS	Tempo de secagem (h)
U	Teor de água do produto no tempo t (decimal (b.s.))
U <sub>ant</sub>	Teor de água no tempo anterior (kg de água . kg de matéria seca <sup>-1</sup> (b.s.))
U <sub>at</sub>	Teor de água atual (kg de água . kg matéria seca <sup>-1</sup> (b.s.))
U <sub>e</sub>	Teor de água de equilíbrio do produto (decimal (b.s.))
U <sub>i</sub>	Teor de água inicial do produto (decimal (b.s.))
UR	Umidade relativa do ar
U <sub>t</sub>	Teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca <sup>-1</sup> (b.s.))
V	Volume dos grãos (m <sup>3</sup> )
Y	Valor observado experimentalmente
Δt	Intervalo de tempo entre as pesagens (h)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1	Produção, mercado e importância socioeconômica do café .....	23
2.2	Qualidade do café.....	25
2.3	Colheita e processamento do café.....	29
2.4	Secagem do café .....	34
2.5	Modelagem matemática e simulação da secagem .....	40
2.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	42
2.8	Características de cor do café .....	44
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
3.1	Matéria-prima.....	47
3.2	Colheita e processamento .....	47
3.3	Delineamento experimental.....	48
3.4	Sistema e operação de secagem.....	50
3.5	Ajuste dos modelos de secagem .....	53
3.6	Análises .....	58
3.6.1	Análise Sensorial .....	58
3.6.2	Análise de cor .....	59
3.6.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	59
3.6.4	Análises estatísticas.....	60
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>61</b>
4.1	Caracterização da secagem .....	61
4.2	Ajuste de modelos matemáticos.....	71
4.3	Análise sensorial.....	87
4.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	97

<b>4.5</b>	<b>Análise de cor .....</b>	<b>102</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O café é um produto agrícola de indiscutível importância socioeconômica nacional, sendo um dos pilares do agronegócio brasileiro. Está fortemente ligado a economia do País, com produção nacional em 2018 de aproximadamente 61,7 milhões de sacas beneficiadas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2018). Isto mantém o Brasil como maior produtor mundial.

O Brasil também é o maior exportador de café, tendo uma imagem internacional de fornecedor de grandes volumes, mas de baixa qualidade sensorial. Nos últimos anos o País tem tentado mudar essa imagem, impulsionado pelas mudanças e exigências do mercado. Os consumidores vêm optando cada dia mais por consumir baseando-se nos melhores atributos sensoriais do café. 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. Além disto, os cafés especiais podem ter preços muito superiores ao café *commodity* (GIOMO; BORÉM, 2011; RIBEIRO et al., 2011).

Os cafés com maior qualidade sensorial, chamados também de especiais, são caracterizados por apresentar grãos com ausência de qualquer tipo de defeito e grande potencial para que após o processo de torração ocorra o desenvolvimento do *flavor* (TAVEIRA et al., 2014), formado a partir das reações de compostos químicos presentes no grão cru (ALPIZAR et al., 2004; FARAH et al., 2005; RIBEIRO et al., 2016).

No entanto, 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). Dentre os

fatores tecnológicos as etapas de processamento e secagem se destacam, sendo realizados vários trabalhos com o objetivo de explicar de que forma essas etapas influenciam a qualidade dos cafés.

O processamento influencia a qualidade do café, sendo que existem dois métodos utilizados: via seca e via úmida. Do processamento via úmida obtém-se três tipos de cafés, os descascados, os despolpados e os desmucilados, que têm parte da estrutura dos frutos retirada, enquanto que no processamento via seca, o fruto é secado inteiro e obtém-se o café natural. Devido as diferenças no perfil sensorial dos cafés obtidos pelos diferentes processamentos, diversos autores têm se dedicado a realização de estudos que mostram uma tendência de cafés naturais produzirem bebidas mais doces e encorpadas, enquanto cafés produzidos por via úmida tendem a resultar em uma bebida com acidez mais equilibrada e aroma acentuado (BORÉM et al., 2008; ILLY; VIANI, 2005; SANTOS et al., 2009). Os cafés naturais são geralmente associados à menor qualidade.

A secagem é outro fator de grande influência na qualidade final da bebida do café. Apesar de ser uma operação de rotina, fatores como a exposição do produto a altas temperaturas podem levar a danos na qualidade. Além disto, é a etapa de maior demanda de energia, com conseqüente altos custos financeiros.

A secagem do café é tradicionalmente 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. No entanto, visando uma maior eficiência, frequentemente aplica-se a combinação desses dois métodos, utilizando-se um período de pré-secagem em terreiro, quando o café ainda possui elevado teor de água, e a complementação da secagem em secadores mecânicos, com temperaturas elevadas (BORÉM, 2014). Pode-se ainda ocorrer a combinação de dois secadores mecânicos.

Os frutos podem ser colhidos com até 1,86 b.s. (65% b.u.), e durante a secagem esse teor de água é reduzido a valores de 0,12 b.s. (11% b.u.). Esse

decréscimo do teor de água reduz riscos com respiração, fermentação, oxidação e desenvolvimento de microrganismos. Porém se feito de maneira incorreta a secagem influenciará negativamente a qualidade devido alterações indesejáveis.

A secagem ocorre por diferença de pressão de vapor de água entre o grão e o ar de secagem, sendo necessário que a pressão de vapor dos grãos seja maior que a pressão do ar de secagem. Normalmente esse gradiente de pressão é função do aumento da temperatura do ar de secagem, porém temperaturas acima de 40 °C na massa de grãos causam danos térmicos e conseqüentemente perda de qualidade sensorial da bebida do café (TAVEIRA, 2012).

Assim como a temperatura do ar, a umidade relativa, o fluxo de ar e a temperatura da massa de café são de extrema importância na secagem. O desenvolvimento de secadores que proporcionem uma maior taxa de secagem do café, sem o uso de temperaturas elevadas do ar de secagem se torna uma ótima alternativa, pois combina maior velocidade de secagem, diminuindo assim riscos devidos a altos teores de água, com ausência de danos térmicos (ISQUIERDO, 2011).

Nessa década o uso de baixas umidades do ar de secagem tornou-se uma alternativa para aumentar a taxa de secagem, principalmente após o desenvolvimento de secadores comerciais. Para café, alguns trabalhos têm sido realizados utilizando baixas umidades relativas do ar de secagem (ISQUIERDO et al., 2013; ALVES et al., 2013; AMARAL et al, 2018), e os resultados apresentados são promissores, principalmente por possibilitar o uso de temperaturas mais baixas do que as indicadas para secagem do café. Porém, a maioria dos trabalhos visando qualidade vem sendo realizados com cafés naturais e com aplicação contínua de baixas umidades relativas na massa de grãos, deixando uma lacuna de informações a ser preenchida quanto a variação do momento de aplicação da baixa umidade relativa e seus efeitos na qualidade e na cinética de secagem do café em pergaminho.

Dessa forma, objetivou-se neste trabalho, estudar a influência que diferentes umidades relativas do ar de secagem após meia seca têm sobre a cinética de secagem e na qualidade dos cafés descascados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Produção, mercado e importância socioeconômica do café

O café é umas das culturas mais tradicionais da agricultura brasileira e também uma das bebidas mais apreciadas no mundo (FAGAN et al., 2011; DULLO et al. 2009), tornando-se assim uma das mais importantes *commodities* agrícolas exportadas.

No mercado mundial do café, o Brasil se destaca como o maior produtor e exportador do produto, com produção estimada em 61,7 milhões de sacas beneficiadas para safra de 2018 (CONAB, 2018), e sendo responsável em 2017 por 33,1% da produção mundial, de acordo com a International Coffee Organization (ICO, 2018).

Segundo o levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), o estado de Minas Gerais lidera a lista dos maiores produtores de café no Brasil. A produção estimada do estado foi de 33,4 milhões de sacas, equivalente a 54,2% do total produzido no país em 2018. A região sul e centro-oeste de Minas Gerais foram as que mais contribuíram para a produção mineira, com cerca de 17,9 milhões de sacas.

A exportação brasileira em 2017 foi de 30,9 milhões de sacas beneficiadas, resultando em uma receita cambial de US\$ 5,2 bilhões. Em 2018, o número de sacas exportadas e a receita cambial gerada foi de 35,2 milhões e US\$ 5,1 bilhões respectivamente (CONSELHO DOS EXPOSTADORES DE CAFÉ DO BRASIL - CECAFÉ, 2018). Quanto ao consumo, o Brasil ocupa a segunda colocação, com o mercado interno absorvendo cerca de 21,9 milhões de sacas em 2017, valor 3,5% maior que o observado no ano anterior (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ – ABIC, 2018).

Nos últimos anos o mercado consumidor vem se modificando, e a procura por cafés de melhor qualidade tem aumentado significativamente. Tamanho é essa procura que a demanda por grãos de melhor qualidade, chamados de especiais, vem crescendo em ritmo acelerado quando comparada à demanda de café *commodity*, caracterizado por apresentar menor qualidade e sua produção priorizar grandes volumes. O crescimento tem sido de cerca de 15% ao ano para os cafés especiais contra 2% de *commodity*. O segmento de cafés especiais representa hoje cerca de 12% do mercado internacional da bebida, e seu valor pode ser de 30 a 40% acrescidos do valor do café convencional, e em alguns casos esse valor pode ultrapassar 100% (BSCA, 2017).

Com base na produção brasileira em 2017, o volume de cafés especiais no país representou cerca de 7,7 milhões de sacas. As cooperativas brasileiras têm dado suporte aos produtores que querem ingressar no setor de cafés especiais. Em leilões e prêmios pelo mundo, os cafés brasileiros são cada vez mais valorizados, entretanto, os preços ainda variam muito (BSCA, 2017).

No Brasil, o segmento deve crescer ainda mais nos próximos anos (BSCA, 2017), devido à presença de diferenças regionais de caráter social, econômico, cultural e edafoclimático não encontradas em outros países produtores, o que eleva o potencial competitivo brasileiro na produção de cafés com ampla variedade de sabores e aromas (ALVES, 2007). A capacidade do País de produzir cafés diferenciados também é descrita por Brasil (2015), pois suas dimensões continentais, apresenta uma variedade de climas, relevos, altitudes e latitudes que permitem a produção de uma ampla gama de tipos e qualidades de cafés.

A importância socioeconômica da cultura para o País é incontestável, devido a geração de divisas com a exportação e a mão de obra empregada nas diferentes etapas de produção (ARAUJO et al., 2008). A cadeia produtiva do café é responsável pela geração de mais de 8 milhões de empregos diretos e indiretos

no país, proporcionando renda e acesso à saúde e à educação para os trabalhadores e suas famílias (BRASIL, 2016), originando empregos em todos os setores da economia, desde o de máquinas, equipamentos e insumos, passando pela produção no campo e pela indústria, até o setor de serviços, como logística e comércio.

No sul de Minas Gerais, o início do período da colheita do café impulsiona a geração de empregos, que segundo a Fundação Procafé (2017), só nesta época gera cerca de 300 mil empregos na região ao longo de toda a cadeia produtiva. Segundo Soares (2015), as dez maiores cidades do Sul de Minas fecharam os sete primeiros meses do ano de 2015 com saldo positivo de contratações devido a colheita do café. Nos sete primeiros meses do ano, a agropecuária foi responsável pela geração de 5.346 vagas de trabalho nas maiores cidades do Sul de Minas.

Apesar da importância socioeconômica ser evidente, o Brasil ainda não aproveita em totalidade seu potencial no setor produtivo, tornando-se necessário mais investimentos a fim de agregar valor ao produto final, principalmente ao produto exportado, gerando maior retorno financeiro e mais competitividade às empresas brasileiras de café frente ao mercado globalizado. Além disso, é necessário investir em pesquisas, gerar novas tecnologias e inovações para atuar nos pontos críticos que podem beneficiar o agronegócio café (BARBOSA et al., 2015), para que se mude o cenário atual, onde geralmente países tropicais em desenvolvimento cultivam a cultura do café e a utilizam como fonte de renda, enquanto os países não tropicais participam do comércio cafeeiro por meio da industrialização de seus produtos (MONDEGO et al., 2011).

## **2.2 Qualidade do café**

A qualidade é o fator de maior importância na determinação de valores da maioria dos produtos agrícolas, sendo fundamental na conquista de novos

mercados. Vários mercados têm considerado sustentabilidade socioambiental como qualidade intrínseca e passaram a exigir informações de origem e de todo o processo produtivo, pois o consumidor quer saber como seu alimento foi produzido e está disposto a pagar mais por isso. Neste sentido, Malta et al. (2003) já afirmavam que no mercado consumidor de café, existia uma crescente exigência quanto à qualidade da bebida, origem e formas de preparo dos grãos, fato que é evidenciado ainda mais nos dias atuais. Dessa forma, os produtores buscam aperfeiçoar as técnicas de produção, visando obter um produto diferenciado e, conseqüentemente, mais valorizado para comercialização.

É difícil definir qualidade do café, uma vez que cada mercado já possui padrões estabelecidos, assim, de forma genérica, pode-se dizer que a qualidade está ligada ao prazer que a bebida pode proporcionar, seja por meio de algum atributo específico, processo de produção ou serviço a ele associado.

A qualidade da bebida do café está associada ao conjunto de atributos químicos, físicos e sensoriais responsáveis pelo sabor e aroma da bebida (TAVARES, 2012) e é dependente tanto da matéria-prima quanto do ponto de torra utilizado na industrialização (MALTA e CHAGAS, 2009). Portanto, pode ser influenciada por diversos fatores, entre eles, genéticos, culturais, ambientais, de colheita, processamento, secagem, armazenamento, beneficiamento e industrialização (ALPIZAR; BERTRAND, 2004; BORÉM et al., 2008a; CARVALHO et al., 1994; FARAH et al., 2006; MALTA et al., 2003; PIMENTA et al., 2008; TOLEDO et al., 2016). Nesse sentido, Favarin et al. (2004), afirmam que a fim de se obter café de qualidade superior, os cuidados com a colheita e o manejo pós-colheita tornam-se fundamentais para a comercialização e aumento do lucro do cafeicultor.

Os cafés de maior qualidade são conhecidos mundialmente como cafés especiais. Os cafés especiais diferenciam-se dos cafés comuns por características relacionadas com a qualidade da bebida, o aspecto físico dos grãos, o local de

origem, a forma de cultivo e de colheita, o tipo de preparo, as cultivares e a quantidade limitada de produção, dentre outras (GIOMO; BORÉM, 2011; PICCINO et al., 2014).

Atualmente, a definição de café especial mundialmente reconhecida é a estabelecida pela *Specialty Coffee Association* (SCA). De acordo com a SCA, para o café ser considerado como especial, ele não pode apresentar nenhum tipo de defeito primário (grão de café totalmente preto, ardido, colonizado por fungos, brocado com ataque severo, café em coco, paus, pedras e outras impurezas) e pode ter até, no máximo, cinco defeitos secundários (grão de café parcialmente preto, ardido, café em pergaminho, mofado, imaturo, malformado, concha, quebrado, casca e brocado (ataque leve)). Não pode apresentar nenhum grão *quaker* (imaturo) no café torrado e a qualidade sensorial deve apresentar pontuação mínima de 80 pontos (LINGLE, 2011). O café que recebe pontuação mínima de 80 pontos não apresenta defeito na bebida e possui doçura. Esses cafés equivalem a um café bebida mole, de acordo com a Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003 (BRASIL, 2003; GIOMO; BORÉM, 2011).

A qualidade e a complexidade da bebida é, certamente, o principal diferencial de um café especial, o qual é tanto mais valorizado quanto mais rara e exótica for a sensação de prazer e percepção sensorial proporcionada ao consumidor (GIOMO; BORÉM, 2011).

Vários indicadores de qualidade do café podem ser obtidos por meio do resultado de diversas análises desenvolvidas. Essas análises fornecem informações sobre o estado físico, fisiológico e químico do produto e ajudam a compreensão dos fenômenos e/ou alterações que ocorrem nos grãos submetidos a diferentes processos na pós-colheita. O conhecimento desses indicadores torna-se importante por possuírem grande correlação com os aspectos sensoriais detectados na prova de xícara.

A análise sensorial é o principal indicador da qualidade do café, pois mesmo um produto apresentando excelentes características físicas, químicas e microbiológicas, é imprescindível que as características sensoriais atendam às exigências do consumidor (DELLA LÚCIA et al., 2006). O princípio dessa análise é baseado nas percepções gustativas e olfativas experimentadas por provadores certificados durante a avaliação.

No Brasil, a análise sensorial adotada pela classificação oficial brasileira (COB), classifica os cafés em bebida estritamente mole, mole, apenas mole, dura, riada, rio e rio zona (BRASIL, 2003). Esse tipo de avaliação é empregado exclusivamente para o café commodity, isso porque os procedimentos são menos criteriosos que o de outras metodologias, principalmente quanto à torra do café. Esse tipo de avaliação se baseia em poucos atributos do produto, como acidez, corpo e ausência de defeitos (FERIA-MORALES, 2002), sendo, por isso, não utilizado para a análise sensorial de cafés especiais.

Para a avaliação de cafés especiais é adotado o método da SCA, proposto por Lingle (2011). O método da SCA identifica o potencial de qualidade e de utilização de um determinado café e segue protocolos já estabelecidos para a realização da análise sensorial. Baseia-se em uma análise sensorial descritiva quantitativa da bebida, realizada por profissionais habilitados. São atribuídas notas de 0 a 10 pontos, com intervalos de 0,25 pontos na avaliação dos 10 principais atributos que compõem o perfil sensorial do café, sendo eles: fragrância/aroma, uniformidade, defeitos, doçura, sabor, acidez, corpo, sabor residual, equilíbrio e impressão geral do café. A somatória das notas individuais de todos os atributos constitui a nota final, que representa a qualidade global do café, sendo considerados como especiais aqueles que apresentam notas acima de 80 pontos. Conjuntamente, é feita a descrição das principais características organolépticas da bebida, valorizando os atributos favoráveis e penalizando os desfavoráveis à sua qualidade.

É importante ressaltar que para a análise sensorial da bebida na avaliação física do café torrado da metodologia SCA (2009) em 100 gramas de amostra de café torrado, não é permitida a presença de grãos imaturos. Para os atributos, doçura, uniformidade e a ausência de defeitos (xícara limpa) o degustador faz um julgamento de cada xícara, individualmente, concedendo dois pontos por xícara por atributo (10 pontos é o resultado máximo para o conjunto de cinco xícaras).

Pelo fato de a análise sensorial do café ser uma classificação subjetiva, podendo, ainda, variar de degustador para degustador, várias pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de relacionar as características sensoriais da bebida com características químicas e físico-químicas, como forma de complementar ou auxiliar a interpretação dos resultados obtidos na análise sensorial (BHUMIRATANA et al., 2011; BORÉM et al., 2016; CHEONG et al., 2013; FARAH et al., 2006; FIGUEIREDO et al., 2015; KWON et al., 2015; PICCINO et al., 2014; RODARTE, 2008; SALAZAR et al., 2015; SILVA et al., 2014; TOLESSA et al., 2016). Mesmo conseguindo resultados satisfatórios de correlação entre alguns métodos químicos e a qualidade sensorial do café, esses por si só ainda não são aceitos oficialmente para avaliar a qualidade desse produto, principalmente devido à diversidade e à complexidade dos fatores envolvidos nos parâmetros de qualidade do café e, por isso, quando são utilizados, não dispensam a avaliação dos provadores (SCHMIDT; MIGLIORANZA, 2010), sendo necessários mais estudos para estabelecer sua correlação com os atributos sensoriais da bebida.

### **2.3 Colheita e processamento do café**

Por possuir mais de uma floração, o cafeeiro caracteriza-se por apresentar em uma mesma planta, ao longo de toda a colheita, frutos em diferentes estádios de maturação (BORÉM & REINATO, 2006). Durante o desenvolvimento da

drupa do cafeeiro e conseqüentemente a maturação da mesma, os teores dos constituintes químicos sofrem grandes variações, até atingirem níveis ideais, característicos do fruto maduro. O estágio cereja é o ponto ideal de maturação para a colheita e refere-se ao momento em que o fruto apresenta composição química plenamente desenvolvida e equilibrada, com o máximo potencial de expressão de qualidade de bebida. Arruda et al. (2011), afirma que os grãos de café no estágio de cereja agregam os precursores químicos mais importantes para gerar bebidas de qualidade após a torrefação.

O café pode ser colhido de maneira mecanizada, semimecanizada ou manual, por derriça completa ou colheita seletiva, sendo colhidos somente os frutos maduros. No Brasil, o método de colheita do café predominante é por derriça completa, pelo qual se obtém um produto com elevado teor de água e bastante heterogêneo, constituído de frutos maduros (cereja), imaturos (verde), e sobremaduros (passa e seco), além de folhas, ramos, paus, pedras, terra, etc (BORÉM, 2008). Assim, colheitas realizadas tardiamente podem apresentar maiores porcentagens de frutos secos e passíveis de fermentações indesejáveis. Já nas colheitas antecipadas, com maiores teores de frutos verdes, poderão resultar em defeitos verdes e verde-pretos. Para ambas as situações, ocorrendo depreciação do aspecto, do tipo e da bebida, a produção de cafés de maior qualidade estará comprometida.

Uma alternativa é a colheita realizada de maneira seletiva, que reduz estes riscos, aumentando com isso, a possibilidade de produzir cafés com qualidade. Isso porque são colhidos frutos em estágio “cereja”, considerado o ponto ideal de maturação para a colheita (CORTEZ, 2001).

Após a colheita, o café deverá ser submetido ao processo de separação de impurezas, com finalidade de retirar as impurezas menos densas (folhas, gravetos e outras impurezas), maiores e menores que os frutos. Em seguida, o café deve passar pelo separador hidráulico, onde será lavado e sua separação realizada por

diferença de densidade, na qual os frutos mais densos (maduros e verdes) são separados da porção de menor densidade, chamada de cafés bóia (secos, brocados e mal granados, etc). Os cafés bóia são responsáveis pela formação de alguns defeitos (GUIMARÃES, 1995; ORNELLAS, 2001).

Após a separação, o café deve seguir imediatamente para o processamento, não podendo ser armazenado por períodos superiores a 8 horas, devido aos riscos de ocorrerem fermentações indesejáveis e a formação do defeito ardido, podendo, assim, inviabilizar a produção de cafés especiais (BRANDO, 2004).

O processamento do café é uma das principais etapas pós-colheita, promovendo a separação dos frutos pelo estágio de maturação, teor de água, tamanho e densidade, dentre outros, resultando em lotes mais homogêneos que facilitam as operações posteriores, principalmente a secagem (ALVES et al., 2013). Essa etapa se torna importante, uma vez que, a separação dos frutos verdes (imaturados) dos frutos cereja é fundamental para a obtenção de uma bebida de melhor qualidade (WINTGENS, 2004).

Dois métodos são utilizados para o processamento de café, o por via seca e o por via úmida. Em ambos os processamentos o objetivo é secar o café até níveis seguros para seu adequado armazenamento e beneficiamento (FIGUEIREDO, 2010), eliminando riscos com oxidação e fermentações indesejáveis (SAATH et al., 2012).

Na via seca os frutos são secos na sua forma integral, originando o café natural ou em coco. Na via úmida são produzidos os três tipos de café em pergaminho. O café descascado é obtido por meio da remoção mecânica do exocarpo e parte do mesocarpo; o café desmucilado, removendo-se o exocarpo e mesocarpo mecanicamente; e o café despulpado é obtido removendo-se mecanicamente o exocarpo e por meio fermentação biológica a parte restante do mesocarpo (BORÉM et al., 2014; MALTA, 2011; CLEMENTE et al., 2015).

A qualidade do café está muito associada aos compostos presentes nos grãos, sendo que os teores desses compostos dependem, também, do método de processamento utilizado (TAVEIRA, 2014). O método utilizado no processamento do café determina as características de aroma e sabor da bebida e impõe diferenças peculiares entre os cafés provenientes de cada tipo de processamento pós-colheita (KLEINWÄCHTER; SELMAR, 2010). Esses métodos também apresentam um pronunciado efeito na composição química dos grãos, especialmente os componentes solúveis em água, como açúcares, cafeína, trigonelina e ácidos clorogênicos (DUARTE et al., 2010; SMITH, 1985).

Taveira (2014), observou clara distinção na composição química do grão cru de cafés processados via seca e via úmida com desmucilamento mecânico, em amostras coletadas durante três safras consecutivas na região da Mantiqueira de Minas Gerais, Brasil.

Segundo Illy e Viani (1995), cafés obtidos a partir das diferentes formas de processamento apresentam características distintas na qualidade final e na bebida. Geralmente, autores relatam que o processamento via seca origina cafés com corpo mais acentuado quando comparado com os cafés processados por via úmida. Já os cafés em pergaminho são, na maioria das vezes, descritos com acidez mais elevada e aroma suave (GHOSH; VENKATACHALAPATHY, 2014; MAZZAFERA; PURCINO, 2005; SELMAR et al., 2014). Porém são comumente encontrados na literatura, trabalhos que associam os cafés processados por via úmida a bebidas superiores, em comparação com os cafés processados por via seca (ARRUDA et al., 2011; BORÉM et al., 2013; CORADI et al., 2008; LIMA-FILHO et al., 2013).

Oliveira (2010), em estudo realizado utilizando o protocolo de análise sensorial da SCA para avaliar os atributos do café processados em dois diferentes tipos de processamento (via seca e via úmida) e quatro diferentes métodos de

secagem, concluiu que, independentemente do método de secagem, os cafés despolpados apresentaram melhores notas nos atributos sensoriais analisados.

Outra vantagem do processamento via úmida é que com a remoção da casca e mucilagem do café, trabalha-se com menores volumes e conseqüentemente, exige-se menores áreas de terreiros e menor demanda de secadores. A rápida eliminação do exocarpo e de parte do mesocarpo, fontes de fermentação e retardamento da secagem, facilita a obtenção de cafés de boa bebida, pois reduz os riscos devido ao menor tempo de secagem (BORÉM, 2008).

Quanto aos aspectos fisiológicos, cafés processados por via úmida apresentam ter qualidade fisiológica superior aos processados via seca (ALVES, 2013; MALTA et al., 2013; TAVEIRA et al., 2012). Uma das hipóteses para essa menor qualidade fisiológica dos cafés naturais, é o maior período de exposição ao ar de secagem que são submetidos, assim como o uso de temperaturas de secagem mais elevadas, devido o maior número de barreiras físicas. 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 escolha do método de processamento do café depende de diversos fatores, tais como as condições climáticas; investimento em tecnologia e equipamentos, exigência do mercado consumidor quanto às características do produto e outorga para uso de água e disponibilidade de tecnologia para o tratamento das águas residuárias, dentre outros (BORÉM, 2008; CASTOLDI; CASTOLDI, 2013). No Brasil, em torno de 90% da produção total de café é processada via seca (ICO, 2018; MALTA; CHAGAS, 2010).

É crescente o número de produtores brasileiros que estão empregando o processo por via úmida, o qual favorece a secagem, além de favorecer a obtenção de cafés de melhor qualidade. Entretanto, apesar de ser um processo que pode agregar qualidade à bebida do café e contribuir para alcançar boas cotações no

mercado interno e externo, requer mais investimentos e mão-de-obra, além de maiores gastos de água em relação ao preparo natural.

## **2.4 Secagem do café**

Após o processamento do café, a etapa de secagem passa a ser de extrema importância, tanto sob aspecto de consumo de energia como da influência que essa operação tem sobre a qualidade final do produto, levando pesquisadores a buscarem novas tecnologias que atendam às necessidades dos produtores.

Os frutos do café, geralmente, são colhidos com teor de água variando entre 0,428 e 1,857 b.s., dependendo do seu estágio de maturação. Deve-se optar sempre que possível por colher o fruto no estágio de maturação cereja, indicado para a produção de cafés de qualidade (DALVI et al., 2013). Frutos cereja apresentam pleno desenvolvimento de seus compostos, porém, também apresentam elevado teor de água que acelera a atividade metabólica do fruto, tornando-se assim, necessária a remoção da água pela secagem, devido aos riscos de deterioração. Por outro lado, se não forem utilizadas técnicas ideais de secagem, a qualidade poderá ser prejudicada devido a alterações físicas, químicas e sensoriais indesejáveis que podem ocorrer durante esta etapa.

No Brasil, são utilizados, basicamente, três métodos para secagem de café (SILVA & BERBERT, 1999): secagem artificial em terreiro, secadores mecânicos e secagem combinada (terreiro e secador mecânico). O tipo de secagem utilizada depende das condições de infraestrutura e de capitalização de cada produtor.

Na secagem em terreiros espalha-se o produto sobre pisos de cimento, tijolo, chão batido ou lama asfáltica, podendo ainda ser espalhado em leito suspenso, com o objetivo de expor o produto diretamente à radiação solar e movimentação natural do ar, devendo os grãos serem revolvidos periodicamente.

Reinato et al. (2012) verificaram que a qualidade do café é influenciada tanto pelo tipo de terreiro quanto pela espessura da camada de secagem. Esse método ainda é o predominante devido seu menor custo e simplicidade de construção e operação quando comparado a secagem mecânica, porém possui grandes desvantagens, dentre elas destacam-se a maior exposição e dependência as condições climáticas, maior período de secagem e maior demanda de espaço (BORÉM, 2008; SILVA et al., 2013). Esses problemas podem ser eliminados com a secagem mecânica em altas temperaturas.

No método de secagem mecânica, a água é retirada do produto por intermédio de ar aquecido forçado a passar através da massa de grãos. Esse método exige maiores investimentos na construção ou na aquisição, bem como no consumo de combustível (BORÉM et al., 2008; SILVA et al., 2013). As principais vantagens do método são o menor tempo de secagem, controle da temperatura, do fluxo do ar e do tempo de exposição da massa ao ar aquecido, assim como sofrer menores influencias das condições climáticas. Esses fatores são fundamentais para garantir a eficiência do processo e conseqüentemente manter a qualidade do produto.

A secagem combinada utiliza os dois métodos, secagem em terreiros e em secadores. Primeiramente, realiza-se a pré-secagem em terreiro até o café atingir a meia seca (aproximadamente 0,428 b.s., para o café natural e 0,333 b.s., para o café descascado). Posteriormente, o produto é levado a secadores e a secagem é completada utilizando-se altas temperaturas (BORÉM et al., 2008; RESENDE et al., 2007; SILVA et al., 2013).

A principal função da secagem é retirar grande parte da água contida no café, garantindo condições seguras de armazenamento por longos períodos, sendo essa redução realizada geralmente até 0,123 b.s.. Esse fato baseia-se no fundamento de que a redução da quantidade de água disponível, reduz-se a atividade de água e, conseqüentemente, a velocidade das reações químicas,

bioquímicas e do desenvolvimento de microrganismos, contribuindo para um armazenamento seguro por períodos maiores de tempo (CHRISTENSEN & KAUFMANN, 1974).

#### **2.4.1 Teoria de secagem**

O processo de secagem se dá por meio da transferência simultânea de calor do ar para o produto, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido, e de massa, por meio do fluxo do vapor d'água, do produto para o ar (FOUST et al., 1982).

A redução do teor de água ocorre por diferença de pressão de vapor d'água entre o ar e o produto, sendo necessário que a pressão parcial de vapor d'água da superfície do produto seja maior que a pressão parcial de vapor d'água do ar de secagem (ATHIÉ, 1998; BORÉM et al., 2014; PABIS et al., 1998). Já a migração de água do interior para a superfície dos grãos ainda não é bem conhecida. Numerosos mecanismos térmicos e físicos têm sido propostos para descrever o transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos, dentre eles podemos citar a difusão líquida e a difusão de vapor (BROOKER et al., 1992). Em trabalhos mais recentes tem sido afirmado que essa migração hora se dá por difusão líquida de água, hora por difusão de vapor d'água.

Para grande parte dos produtos, o processo de secagem sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, pode ser dividido em dois períodos, denominados períodos de velocidade constante e decrescente.

O período de velocidade constante é muito curto e ocorre nos primeiros momentos da secagem, quando o produto se encontra com teor de água elevado. Nesse período, a temperatura do grão se mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam. 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 (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 et al., 1992).

#### **2.4.2 Taxa de redução de água**

Quando se trabalha com secagem de produtos agrícolas, a taxa de redução de água se torna um parâmetro importante a ser estudado. A taxa de redução de água é a relação entre água perdida pelo produto e o tempo necessário para essa perda, sendo influenciada principalmente pela temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, assim como pelo teor de água do produto. Todos esses fatores possuem efeito significativo sobre a qualidade do produto (BORÉM, 2008).

Taxas de redução de água elevadas podem causar descoloração, manchas, trincas e rupturas nos grãos (GUNASEKARAN et al., 1985, citado por CORRÊA et al., 2002; BORÉM, 1992), assim como o extravasamento do líquido intercelular provocado pela ruptura da membrana celular. Enquanto taxas de secagem baixas poderão ser prejudiciais à qualidade do café, uma vez que altos teores de água iniciais, aumentam os riscos de deterioração. Tendo em vista esses problemas e seus efeitos sobre a qualidade final da bebida, busca-se um controle maior dos fatores de secagem para se minimizar situações adversas ao produto.

Para Burmester e Eggers (2010), a taxa de secagem é influenciada, principalmente, pela temperatura do ar de secagem, sendo o fluxo de ar coadjuvante, só tendo influência na taxa de secagem enquanto o café estiver com teor de água elevado, logo no início da secagem. Da mesma forma, Ribeiro et al. (2003) que já haviam estudado a cinética de secagem de café cereja descascado, observaram que, independentemente da temperatura do ar de secagem o aumento do fluxo de ar de 20 para 30  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  tem efeito significativo na taxa de redução de água apenas nas primeiras horas de secagem. Os autores observaram, ainda, que o fluxo de ar não teve influência na qualidade sensorial da bebida. Quanto aos valores de fluxo de ar de secagem, particularmente na secagem com ar aquecido, fluxos inferiores a 6  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$  podem prolongar excessivamente o tempo de secagem, ao passo que acima de 20  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ , podem tornar o processo antieconômico (VILLELA & PESKE, 2003).

A temperatura do ar de secagem é o parâmetro de maior flexibilidade num sistema de secagem em altas temperaturas, influenciando significativamente a taxa e a eficiência de secagem, bem como a qualidade final do produto e, se não for controlada, provoca sérios danos aos grãos, causando sua depreciação (AFONSO JÚNIOR, 2001; OCTAVIANI, 2000; RIBEIRO, 2003). Temperaturas mais altas tornam a operação de secagem mais rápida e, portanto, mais econômica (GIRANDA, 1998). Porém, diversas pesquisas têm demonstrado que temperaturas, na massa de café, acima de 40°C causam prejuízos à qualidade do café (BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA, 2010; SAATH et al., 2010; TAVEIRA, 2012).

Visando aumentar a taxa de secagem sem riscos de danos térmicos e de forma economicamente viável, a desidratação do ar de secagem para café se torna uma opção interessante a ser estudada. O processo pode ocorrer por 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 et al., 2006; ONDIER et al., 2010).

Para isso, a evolução dos dispositivos para condicionamento e circulação do ar, já conhecidos pela indústria de sementes em processos de resfriamento, levou à adaptação desses sistemas para desumidificação e aquecimento do ar, originando os Sistemas de Condicionamento de Ar (SCA). Esses equipamentos possuem a capacidade de desumidificar o ar por resfriamento, condensando o vapor de água presente no ar, com posterior aquecimento, para a obtenção de ar com menor umidade relativa. Dessa forma, ocorre aumento da capacidade de retenção de água pelo ar e redução da razão de mistura, resultando numa massa de ar mais seca, sendo possível trabalhar com temperaturas mais baixas, evitado assim, os danos térmicos aos grãos.

Ondier, Siebenmorgen e Mauromoustakos (2010) estudaram a taxa de secagem de grãos de arroz, submetidos à secagem com baixas temperaturas e umidade relativa do ar entre 19% e 47%. Os autores observaram que, para uma mesma temperatura, a redução da umidade relativa reduziu significativamente o tempo de secagem. A qualidade do arroz, avaliada em função do rendimento de grãos inteiros e da coloração dos grãos, não foi afetada negativamente pelo aumento da taxa de secagem, indicando o uso dessa técnica de desumidificação do ar para a secagem de arroz.

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

## 2.5 Modelagem matemática e simulação da secagem

Os estudos da cinética de secagem têm despertado o interesse de vários pesquisadores para os mais diferentes produtos, pois de acordo com Resende, Ferreira e Almeida (2010), a simulação matemática da secagem é fundamental para a compreensão dos processos relacionados. Nesse sentido, o emprego de algumas técnicas, como o ajuste de modelos matemáticos, pode trazer algumas contribuições (ALVES et al., 2013; CORRÊA et al., 2010; ISQUIERDO et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013).

Numerosos modelos têm sido propostos para descrever a taxa de redução de água durante a secagem em camada fina de materiais biológicos (ERBAY; ICIER, 2010), dentre estes modelos podemos citar os de Page, Midilli, Valcam, dentre outros. Estes estudos são fundamentais no desenvolvimento de modelos para simulação matemática da secagem de produtos agrícolas. Uma equação descrevendo a taxa de redução de água de uma camada fina é necessária para simulação de secagem em camada espessa porque os modelos de simulação são, geralmente, baseados no pressuposto de que a camada espessa é composta por uma série de camadas finas (KASHANINEJAD et al., 2007).

O ajuste de modelos matemáticos para a secagem dos produtos agrícolas fornece informações de fundamental importância para o desenvolvimento de processos e para o dimensionamento de equipamentos. Com essas informações, pode-se estimar o tempo de secagem e, conseqüentemente, o gasto energético que refletirá no custo de processamento (SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2013; VILELA; ARTUR, 2008).

As curvas de secagem, em camada fina, variam com a espécie, a variedade, as condições ambientais e os métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Neste sentido, na literatura são descritos vários modelos (teóricos, semiempíricos e empíricos) para analisar a secagem dos mais diversos produtos

agrícolas higroscópicos: nabo forrageiro (SOUSA et al., 2011); espiga de milho (CORRÊA et al., 2011); grãos de café (RESENDE et al., 2009); feijão (CORRÊA et al., 2007); sementes de crambe (COSTA et al., 2011; 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; ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011).

Existem três tipos de modelos de simulação matemática do processo de secagem em camada fina, que visam descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. Os modelos 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. Esses modelos 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 à superfície do produto. Já os modelos 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).

Na maioria das vezes, os modelos empíricos e semiempíricos, devido à facilidade de seu uso, têm se mostrado como melhores opções para representar o processo de secagem de produtos agrícolas, apesar de sua validade estar restrita às faixas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Conforme as condições do processo de secagem, diferentes modelos podem ser ajustados para descrever adequadamente a cinética de secagem de produtos capilares porosos, higroscópicos. Os modelos de Midilli, Page,

Logaritmo, Henderson e Pabis, Page modificado, dois termos, exponencial de dois termos, Newton, Wang e Sing (AKPINAR, 2010; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010; ISQUIERDO et al., 2013; KAYACAN et al., 2018; SOUSA et al., 2011), dentre outros, têm sido ajustados com frequência para prever o processo da secagem de produtos agrícolas.

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

Durante a secagem ocorrem transformações químicas, físicas e fisiológicas nos grãos, devido à exposição do produto a elevadas temperaturas e taxas de secagem utilizadas. Essas transformações poderão resultar na perda da integridade das membranas celulares (BORÉM et al., 2013; RIBEIRO et al., 2003; SAATH et al., 2010), comprometendo assim sua qualidade.

A desorganização e desestruturação das membranas celulares podem ser identificadas pela lixiviação de várias soluções citoplasmáticas. A retirada da água durante a secagem, induz a parede celular à contração e reduz o volume celular, provocando uma aglomeração dos componentes citoplasmáticos, tornando o conteúdo da célula incrivelmente viscoso (HOEKSTRA et al., 2001; SAATH et al., 2010).

Danos causados pela secagem do café, são comumente relacionados à perda de qualidade da bebida. Essa perda de qualidade é resultado da desorganização e desestruturação das membranas celulares, que permitem o contato de componentes químicos com as enzimas hidrolíticas e oxidativas, as quais estão relacionadas aos processos fermentativos, comprometendo o sabor e aroma da bebida (SAATH et al., 2010). Assim, verificar o momento que este fenômeno ocorre durante a secagem e como os parâmetros de secagem interferem nesse processo, torna-se de fundamental importância para obtenção de cafés de maior qualidade.

Em estudos ultraestruturais de tecidos, após dessecação, tem-se verificado que a membrana celular é um dos primeiros pontos de injúria (SAATH et al., 2010). Maior tolerância à dessecação de grãos de café é observada na secagem lenta devido ao tempo para indução e à operação dos mecanismos de proteção das membranas. Essas análises, bem como as das paredes celulares do endosperma, podem colaborar na compreensão dos processos de perda de qualidade durante a secagem (BORÉM et al., 2008; MARQUES et al., 2008).

Marques (2006) utilizou-se da MEV, técnica em análises ultraestruturais de grãos de café e pôde comprovar que o ar de secagem à temperatura de 60 °C influência de maneira negativa a qualidade, provocando rupturas nas membranas celulares, conseqüentemente, o extravasamento de parte do protoplasma, substância viva da célula, no interior das células e nos espaços intercelulares. Porém, não pôde avaliar o momento das rupturas.

Borém et al. (2008) verificaram através de estudos ultraestruturais de microscopias eletrônicas de varredura, que o endosperma dos cafés natural e despulpado, durante a secagem à temperatura de 40 °C e em terreiro, manteve a integridade das membranas celulares e que essas membranas foram danificadas somente entre os teores de água de 0,428 e 0,250 b.s., quando os cafés natural e despulpado foram secados com temperatura de 60 °C.

Borém et al. (2013) estudando a influência da utilização das temperaturas 50 °C e 60 °C no início do processo de secagem até o teor de água de 0,428 b.s., seguido da temperatura de 40°C até o teor de água de 0,123 b.s., para cafés despolpados, observou que não houve interferência na integridade da estrutura celular, porém, quando iniciado a secagem à 40 °C e finalizado a etapa à 60 °C, houve extravasamento intercelular. Fato que corrobora com Saath et al. (2010), que afirma que os maiores danos causados pelo uso da temperatura de 60 °C ocorreram durante a parte final da secagem.

Dessa forma, o estudo por meio de micrografias das estruturas celulares dos grãos de café torna-se uma ferramenta importante para o entendimento dos processos de perda de qualidade durante a secagem.

## 2.8 Características de cor do café

A cor tem sido estudada há alguns anos principalmente pelo branqueamento ocasional do café. Normalmente, os grãos de café atendem ao padrão de cor verde-azulada e que pode mudar gradualmente para verde-amarelada, amarela ou totalmente esbranquiçada, decorrente principalmente de operações de secagem e armazenamento inadequadas (CORADI et al., 2008; LEITE et al., 1998; RIBEIRO et al., 2011). Outros fatores, como danos sofridos pelo produto em qualquer etapa pós-colheita, luz, umidade relativa, teor de água, tempo de armazenagem e tipo de embalagem para armazenamento também exercem influência nas alterações de cor dos grãos (BORÉM et al., 2013; CORADI; BORÉM, 2009; ISMAIL et al., 2013; NOBRE, 2005).

Nobre (2005), afirma que a avaliação das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  tem sido utilizada na caracterização física de grãos de café. Nesse sistema,  $L^*$  indica a luminosidade (0 = preto e 100 = branco) e  $a^*$  e  $b^*$  indicam as direções que a cor pode assumir ( $+a$  = vermelho e  $-a$  = verde;  $+b$  = amarelo e  $-b$  = azul).

No mesmo sentido, a análise de cores provou também ser uma ferramenta valiosa na caracterização adequada da maturação dos frutos (VOSS, 1992; LIDON et al., 2012). O ângulo Hue ( $H^\circ$ ) e Cromo ( $C^*$ ) estão entre os parâmetros de cores mais utilizados (CAMELO; GÓMEZ, 2004; SPÓSITO et al., 2004; LIDON et al., 2012). O parâmetro Hue é uma coordenada cilíndrica que representa a tonalidade variando entre vermelho ( $0^\circ$ ), amarelo ( $90^\circ$ ) e verde ( $180^\circ$ ) e é útil na interpretação de diferenças de cores (CAMELO; GÓMEZ, 2004; VOSS, 1992) e na percepção de frutos e qualidade vegetal (SHEWFELT, 1993). O croma é a

pureza ou saturação da cor (SPÓSITO et al., 2004) e representa a distância do eixo de luminosidade ( $L^*$ ). O croma extremo representa o máximo que uma cor pode conter de si mesma. Cores “puras” mescladas com branco ou com cinza ou com preto ficam empobrecidas em sua saturação. O nível mais baixo de saturação se obtém mesclando uma cor com a sua cor complementar, em partes iguais.

Durante as etapas pós-colheita, o café tem suas características físicas alteradas. A colheita, processamento, secagem e armazenamento influencia os aspectos de forma, tamanho e cor, sendo este último o mais importante, uma vez que ele interfere diretamente na aceitação ou rejeição do produto no mercado, pois a cor está relacionada diretamente com a qualidade da bebida (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 2003).

Alterações na cor são fortes indícios da ocorrência de processos oxidativos e transformações bioquímicas enzimáticas que alteram a composição dos precursores responsáveis pelo sabor e aroma da bebida, resultando em redução da qualidade (ABREU et al., 2015; BORÉM et al., 2013; ISQUIERDO et al., 2011; NOBRE, 2011; RENDÓN et al., 2014; RIBEIRO et al., 2011; SPEER; KÖLLING-SPEER, 2006).

Cafés processados por via úmida possuem naturalmente coloração desejável verde-azulada, distanciando-se da coloração indesejável vermelho-amarelo (CORRÊA et al., 2002). Apresentam também menor variação na coloração quando comparados aos cafés obtidos por via seca, até os oito primeiros meses de armazenamento, porém são mais susceptíveis à ocorrência de danos mecânicos, resultando em maior branqueamento (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 2003). O beneficiamento também pode proporcionar este tipo de dano imediato ou latente, acelerando o processo de branqueamento dos grãos de café. Esta condição provoca a redução na qualidade, devido a desestruturação das membranas celulares e desorganização celular (AMORIM, 1978; SELMAR et al., 2008).

Quanto a secagem, Corrêa et al. (2002) verificaram que o aumento da temperatura do ar de secagem afetou a coloração dos grãos de café, principalmente reduzindo a intensidade da cor verde, independentemente do tipo de processamento empregado.

Menchú (1967) verificou que a secagem em secadores mecânicos altera a cor dos grãos de café, originando uma massa de coloração desuniforme e que temperaturas superiores a 80 °C podem originar grãos de cor acinzentada que, ao absorverem água sofrem branqueamento irregular. Outros autores como Silva (2001), Afonso Júnior (2001) e Corrêa et al. (2002), também relatam que a secagem altera a cor dos grãos de café, especialmente nos secadores mecânicos. Já a secagem em terreiro, por utilizar temperaturas ambientes (mais baixas) não afeta as características de cor dos grãos, quando comparadas com as de cafés secados em secadores.

Vilela et al. (2000), estudando a alteração de cor de grãos de café durante o armazenamento com quatro condições de temperatura (10 °C; 20 °C; 30 °C e 40 °C) e quatro umidades relativas (52%; 67%; 75% e 85%), verificaram que, sob condições constantes, somente a 10 °C de temperatura e umidades relativas do ar de até 67%, os grãos de café mantiveram a cor original durante o período de armazenagem.

Portanto avaliar a coloração dos grãos é de grande importância para detectar alterações provocadas pelas diferentes tecnologias pós-colheita.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Matéria-prima**

Para condução do experimento, utilizou-se como matéria-prima, frutos de café maduros ou “cereja” (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho), colhidos no Sítio Vista Alegre, localizado no município de Nepomuceno, MG (Latitude: 21°12'19,5”S; Longitude: 45°11'27,4”W; Altitude: 980 m), durante a safra de 2018.

#### **3.2 Colheita e processamento**

A colheita dos frutos de café foi realizada manualmente, selecionando somente frutos maduros. Após a colheita, os frutos foram encaminhados ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, da Universidade Federal de Lavras, onde foram submetidos a separação hidráulica para remoção de frutos de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados) e a uma nova seleção manual, para a retirada de frutos imaturos e sobremaduros remanescentes.

Logo após a seleção manual, o café foi processado por via úmida, em equipamento da marca Penagos, modelo DVC 306, resultando-se na porção de “café descascado”, tendo o exocarpo e parte do mesocarpo removidos mecanicamente, apresentando o teor de água de  $1,565 \pm 0,065$  b.s., determinado conforme o método padrão de estufa,  $105 \pm 3$  °C, durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

### 3.3 Delineamento experimental

Para o delineamento dos experimentos de secagem do café, foram realizados nove tratamentos em esquema fatorial 3x3, sendo três temperaturas de bulbo seco (40 °C; 40 °C-35 °C e 35 °C;  $T_{bs}$ ) e três temperaturas de ponto de orvalho (2,6 °C; 10,8 °C e 16,2 °C;  $T_{po}$ ). Foram realizados mais dois tratamentos sem controle de temperatura de ponto de orvalho, com duas temperaturas de bulbo seco (40 °C e 35 °C). Para cada tratamento foram realizadas quatro repetições. Em função das combinações entre temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho, foram obtidas diferentes umidades relativas (UR) do ar de secagem (TABELA 1).

Tabela 1 Temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa do ar de secagem para meia seca e complementação da secagem.

Tratamento	Primeira parte (Meia seca)		Segunda Parte (Complementação da secagem)		
	Teor de água inicial - 1,565±0,065 b.s. Teor de água final - 0,428±0,010 b.s.		Teor de água inicial - 0,428±0,01 b.s. Teor de água final - 0,123±0,006 b.s.		
	T <sub>bs</sub> (°C)	T <sub>bs</sub> (°C)	T <sub>po</sub> (°C)	UR (%)	
1	40	40	2,6	10,0	
2	40	40	10,8	17,5	
3	40	40	16,2	25,0	
4	40	35	2,6	13,1	
5	40	35	10,8	23,0	
6	40	35	16,2	32,7	
7	35	35	2,6	13,1	
8	35	35	10,8	23,0	
9	35	35	16,2	32,7	
10	40	40	-	-	
11	35	35	-	-	

### 3.4 Sistema e operação de secagem

A operação de secagem ocorreu em duas etapas para os tratamentos numerados de um a nove. A primeira etapa se iniciou no momento da entrada dos grãos no secador e seu término ocorreu quando o produto alcançou aproximadamente  $0,428 \pm 0,01$  b.s.. Durante a primeira etapa não ocorreu o controle da  $T_{po}$  e conseqüentemente da UR do ar de secagem. A segunda etapa teve início após o produto alcançar  $0,428 \pm 0,01$  b.s., sendo acionado o controle de  $T_{po}$  e conseqüentemente da UR. As  $T_{bs}$  foram alteradas em relação a primeira etapa, apenas para os tratamentos quatro, cinco e seis, se mantendo inalterada até a massa de grãos alcançar o teor de água de  $0,123 \pm 0,006$  b.s..

As temperaturas de bulbo seco utilizadas nesse experimento são temperaturas normalmente utilizadas para a secagem de café. Com relação às temperaturas de ponto de orvalho, normalmente, no período de pico da colheita do café, entre os meses de maio a agosto, na região Sul de Minas, as temperaturas de bulbo seco e as umidades relativas médias encontram-se, respectivamente, nas faixas de  $16$  °C e 71%, o que corresponde a uma temperatura de ponto de orvalho de, aproximadamente,  $10,8$  °C. Para essa mesma época do ano, as temperaturas de ponto de orvalho alcançam valores aproximados de  $2,6$  °C em regiões produtoras de café mais secas, como o Cerrado Mineiro e  $16,2$  °C em regiões mais úmidas, como as Matas de Minas.

O sistema de secagem foi composto por um sistema de condicionamento de ar acoplado a um secador de camada fixa (FIGURA 1). As características do ar foram controladas por um sistema de condicionamento de ar de laboratório (SCAL), modelo proposto por Fortes et al. (2006). Esse equipamento permite o controle do fluxo, temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ), temperatura de ponto de orvalho ( $T_{po}$ ) e da umidade relativa (UR) do ar de secagem com precisão. Para se obter as menores temperaturas de ponto de orvalho e, conseqüentemente, a menor

umidade relativa, antes do SCAL, o ar foi pré-condicionado por um sistema de refrigeração composto por três unidades de ar condicionado.

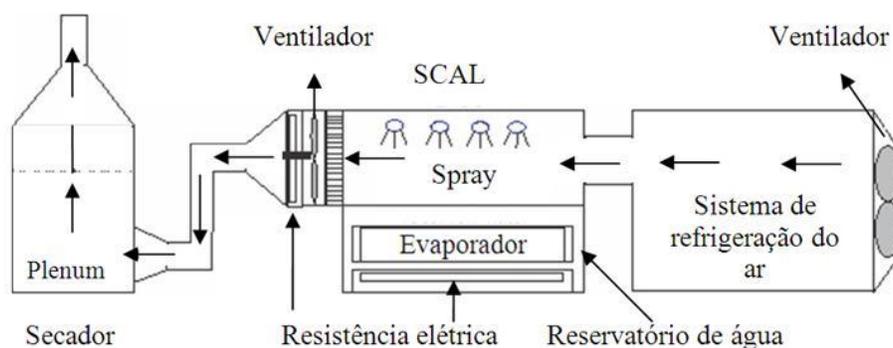


Figura 1 Sistema de secagem utilizado para a secagem mecânica do café. Fonte: Alves (2013).

Este sistema fornece ar com temperatura de ponto de orvalho na faixa de 2 °C a 30 °C e temperatura de bulbo seco de 2 °C a 50 °C, com vazões de até 10 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. O secador foi composto por quatro bandejas removíveis com fundo perfurado, de seção quadrada, com lados iguais a 0,30 m e profundidade de 0,10 m, localizadas sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar. O fluxo de ar foi regulado por um inversor de frequência, marca Weg, modelo CFW-10, que controla a rotação do ventilador centrífugo que insufla o ar aquecido no plenum do secador e a velocidade do ar foi monitorada com o uso de um anemômetro de pás, da marca Instrutherm, modelo TAVR-650. A temperatura de ponto de orvalho foi medida no interior da câmara do SCAL e a temperatura do ar de secagem foi medida no plenum, sob as bandejas de fundo perfurado, por termo-higrógrafos digitais (marca Zettatronic) e termômetros de mercúrio. A umidade relativa do ar de secagem foi medida por termo-higrógrafos digitais portáteis (marca Zettatronic) e por psicrômetro inserido no interior do plenum (psicrômetro

do tipo Assmann). A temperatura dos frutos de café foi medida com termômetros de mercúrio inseridos no centro da massa.

Após o processamento, foram depositados 1,2 kg de café descascado molhado em cada bandeja, promovendo o completo preenchimento de seu fundo (0,30 x 0,30 m), correspondente a uma camada fina de aproximadamente 0,015 m de altura. Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos, o acompanhamento da secagem do produto foi realizado pelo método gravimétrico (Equação 1). As bandejas contendo as amostras foram retiradas do secador e pesadas em uma balança semi analítica com resolução de 0,01 g, a cada quinze minutos na primeira hora de secagem, trinta minutos na segunda hora, a cada hora até aproximadamente  $0,428 \pm 0,01$  b.s. e a cada duas horas até que os grãos de café atingissem o teor de água de  $0,123 \pm 0,006$  b.s.. Após cada tratamento, o teor de água do endosperma dos grãos foi determinado pelo método de estufa,  $105 \pm 1$  °C, durante 16 horas (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 1999). Para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre as bandejas de fundo perfurado, fez-se um rodízio de 90° na posição das bandejas a cada pesagem, assim como o revolvimento da massa de grãos.

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

em que:

$U_t$ : 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).

Para avaliar a velocidade com que a água era evaporada, determinou-se a taxa de redução de água do produto, de acordo com a seguinte expressão:

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

em que:

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 matéria seca<sup>-1</sup> (b.s.));

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

Para todos os tratamentos, a velocidade do ar de secagem foi mantida constante em 0,33 m.s<sup>-1</sup>, correspondendo ao fluxo de 20 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>. Foram obtidos experimentalmente, para o ar de secagem, pontos de estado provenientes da relação entre temperaturas de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e temperaturas de ponto de orvalho ( $T_{po}$ ), sendo estas condições adotadas durante as secagens dos grãos.

Para se determinar o efeito dos diferentes parâmetros (temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho) sobre a cinética de secagem de frutos de café, os dados do coeficiente de difusividade efetivo foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

### 3.5 Ajuste dos modelos de secagem

Na análise de dados de secagem, a razão de umidade (RU) é essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada fina. A razão de umidade durante a secagem, em função das variáveis avaliadas, foi determinada pela Equação 3. A cada tempo de secagem, um teor de água foi correlacionado com o teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio, para condições

específicas de secagem. Dessa forma, em todas as condições testadas, os 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 2.

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

em que:

RU : razão de umidade (adimensional);

U : teor de água do produto no tempo t (decimal, base seca);

U<sub>e</sub> : teor de água de equilíbrio do produto (decimal, base seca);

U<sub>i</sub> : teor de água inicial do produto (decimal, base seca).

O teor de água de equilíbrio higroscópico foi calculado pela Equação 4, para café descascado (AFONSO JÚNIOR, 2001).

$$U_e = (1,8062+0,0273.T -9,8728.UR^{7,0075})^{-2,4999} \quad (4)$$

em que:

U<sub>e</sub> : teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs));

T : temperatura do ar de secagem, (°C);

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

Tabela 2 Modelos matemáticos usados para prever o fenômeno de secagem.

Designação do modelo	Modelo	Equação
Aproximação da Difusão <sup>1</sup>	$RU = (a(\exp(-k t)))+(1-a)\exp(-k b t)$	(5)
Dois Termos <sup>2</sup>	$RU = a \exp(-k_0 t)+b \exp(-k_1 t)$	(6)
Exponencial de dois termos <sup>3</sup>	$RU = (a(\exp(-k t)))+(1-a)\exp(-k a t)$	(7)
Henderson e Pabis <sup>4</sup>	$RU = a \exp(-k t)$	(8)
Henderson e Pabis Modificado <sup>5</sup>	$RU = a \exp(-k t)+b \exp(-k_0 t)+c \exp(-k_1 t)$	(9)
Lewis <sup>6</sup>	$RU = \exp(-k t)$	(10)
Midilli <sup>7</sup>	$RU = a \exp(-k t^n)+b t$	(11)
Midilli Modificado <sup>8</sup>	$RU = \exp(-k t^n)+a t$	(12)
Newton <sup>9</sup>	$RU = \exp(-k t)$	(13)
Page <sup>10</sup>	$RU = \exp(-k t^n)$	(14)
Thompson <sup>11</sup>	$RU = \exp(-a-(((a^2)+(4 b t))^{0.5}))(2 b)^{-1}$	(15)
Valcam <sup>12</sup>	$RU = a+b t+c t^{1.5}+d t^2$	(16)
Verma <sup>13</sup>	$RU = -a \exp(-k t)+(1-a)\exp(-k_1 t)$	(17)
Wang & Sing <sup>14</sup>	$RU = 1+a t+b t^2$	(18)

<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>) e tendência de distribuição

dos resíduos. O desvio padrão da estimativa e o erro médio relativo foram calculados, respectivamente, pelas Equações 19 e 20.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (19)$$

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

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 21) aos dados observados, por meio de regressão não linear, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). Essa equação (21) 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).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ -\frac{n^2 \pi^2 D_{eff}}{R^2} t \right] \quad (21)$$

em que:

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

$R$  : 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 ( $a$ ), largura ( $b$ ) e espessura ( $c$ ), com o uso de um paquímetro digital com resolução de 0,01mm, sendo o volume dos frutos de café ( $V$ ) calculado pela Equação 22 (ISQUIERDO, 2011).

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \quad (22)$$

em que:

$V$  : volume dos grãos ( $\text{m}^3$ );

$a$  : comprimento (m);

$b$  : largura (m);

$c$  : espessura (m).

Após a secagem, as amostras foram acondicionadas em duas embalagens semi kraft e duas de polietileno, sendo armazenadas em câmara com temperatura controlada, a 10 °C e umidade relativa de 60%, até o momento das análises. Antes de cada análise, as amostras foram beneficiadas por meio de duas passagens em equipamento mecânico, da marca Pinhalense, modelo DRC 2.

### **3.6 Análises**

#### **3.6.1 Análise Sensorial**

A análise sensorial foi realizada após dois meses de armazenamento por três degustadores certificados de cafés especiais (SCA). Foi utilizado o protocolo de análise sensorial da Associação de Cafés Especiais (SCA), de acordo com a metodologia proposta por Lingle (2011) para avaliação sensorial de cafés especiais. Nesse método, os atributos são agrupados em duas categorias, sendo uma subjetiva, representada pela fragrância/aroma, sabor, acidez, corpo, equilíbrio, finalização e impressão global, que são pontuados segundo sua qualidade em uma escala de 6 a 10 pontos, com intervalos de 0,25 pontos, e outra objetiva, representada pela uniformidade, doçura e xícara limpa (ausência de defeitos). Os atributos objetivos são pontuados em uma escala de 0 a 10 pontos, sendo atribuídos dois pontos para cada xícara que apresentar normalidade quanto à uniformidade, à doçura e à xícara limpa, avaliando-se cinco xícaras por amostra. A nota final é obtida pela soma das notas de cada atributo.

Foi utilizado o ponto de torra moderadamente leve, determinado visualmente pela coloração dos grãos, correspondente a 58 e 63 pontos, respectivamente, para grãos inteiros e grãos moídos, com tolerância de  $\pm 1$  ponto, conforme o sistema de classificação de cor, por meio de discos padronizados (SCA/*Agtron Roast Color Classification System*). Foram torrados 100 g de grãos

de cada amostra. Durante a torração, fatores que afetam o ponto e a curva de torra, como temperatura e tempo de torra, foram monitorados, respeitando-se a faixa de tempo entre 8 e 12 minutos. Todas as amostras foram torradas com antecedência mínima de 12 horas à degustação.

Em cada avaliação sensorial foram degustadas cinco xícaras de café representativas de cada amostra, com concentração de 5 g de café para cada 100 ml de água, realizando-se uma sessão de análise sensorial para cada tratamento.

### **3.6.2 Análise de cor**

O índice de coloração do endosperma dos grãos de café foi determinado em colorímetro Minolta modelo CM-5, por leitura direta das coordenadas  $L^*$  (luminosidade),  $a^*$  (variação de intensidade do verde ao vermelho) e  $b^*$  (variação de intensidade do azul ao amarelo), descritas por Nobre (2005). Também foram determinadas de forma direta o ângulo Hue (tonalidade) e o Chroma,  $C^*$  (saturação). As amostras foram colocadas em placas de Petri e para cada repetição de secagem, foram realizadas três repetições no colorímetro.

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

Para Microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram utilizados em média quatro fragmentos do endosperma do café, cortados longitudinalmente, por tratamento. Os fragmentos foram fixados em solução Karnovsky 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 (Balzers CPD 030). 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 de 8,5 mm. As imagens geradas foram gravadas e abertas no Software Photopaint do pacote Corel Draw 12, onde foram selecionadas e preparadas.

#### **3.6.4 Análises estatísticas**

Para a curva de secagem foi feita análise de regressão utilizando um modelo que melhor se adequasse aos valores originais. A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para verificar quais variáveis de secagem ( $T_{bs}$  e  $T_{po}$ ) ou de qualidade (fragrância/aroma; sabor; acidez; corpo; finalização; equilíbrio; final; nota total), discriminavam os métodos de secagem trabalhados. Também foram realizadas ANOVA para verificar se os métodos de secagem promovem efeito significativo nos atributos sensoriais e na cor dos grãos beneficiados. Foram utilizados os *softwares* SISVAR® (FERREIRA, 2011) e o Chemoface (NUNES et al., 2012).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização da secagem

Os valores de razão de umidade obtidos durante toda a etapa de secagem são expostos na Figura 2.

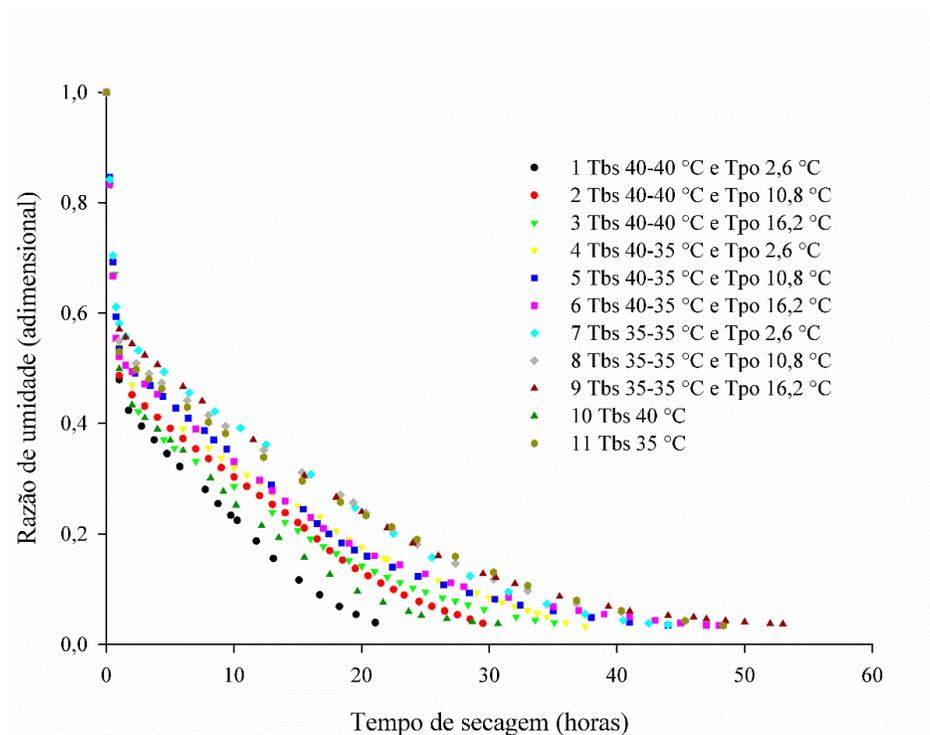


Figura 2 Valores de razão de umidade observados durante a secagem do café descascado, em função do tempo.

Como a secagem foi dividida em primeira parte de secagem (meia seca) e segunda parte de secagem (complementação), sendo cada uma delas expostas a diferentes condições do ar de secagem, fez-se necessário analisa-las separadamente.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos tempos de secagem, teor de água inicial e final dos grãos de café em função das temperaturas de bulbo seco e de ponto de orvalho.

Tabela 3 Valores médios do teor de água e tempo de secagem dos cafés descascados em função da temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e temperatura de ponto de orvalho ( $T_{po}$ ).

Trat.	Primeira parte (meia seca)					Segunda parte (complementação)					Tempo total de secagem	
	$T_{bs}$ (°C)	UR <sup>+</sup> (%)	Teor de água		Tempo de secagem	$T_{bs}$ (°C)	$T_{po}$ (°C)	UR (%)	Teor de água			Tempo de secagem
			Inicial	Final					Inicial	Final		
1	40	18,2	1,642	0,437	9,80	40	2,6	10,0	0,437	0,131	11,30	21,10
2	40	20,9	1,583	0,446	14,00	40	10,8	17,5	0,446	0,130	15,50	29,50
3	40	20,6	1,615	0,439	13,00	40	16,2	25,0	0,439	0,131	22,08	35,08
4	40	20,1	1,638	0,436	16,75	35	2,6	13,1	0,436	0,130	20,75	37,50
5	40	22,3	1,544	0,430	15,42	35	10,8	23,0	0,430	0,129	28,58	44,00
6	40	21,4	1,617	0,425	16,00	35	16,2	32,7	0,425	0,131	32,00	48,00
7	35	32,2	1,500	0,424	19,50	35	2,6	13,1	0,424	0,129	24,50	44,00
8	35	24,2	1,512	0,446	19,33	35	10,8	23,0	0,446	0,129	29,00	48,33
9	35	28,5	1,498	0,438	18,00	35	16,2	32,7	0,438	0,129	35,00	53,00
10	40	18,4	1,577	0,436	11,17	40	-	18,4 <sup>+</sup>	0,436	0,129	19,50	30,67
11	35	26,0	1,544	0,438	19,33	35	-	26,0 <sup>+</sup>	0,438	0,129	29,00	48,33

<sup>+</sup>Umidade relativa média do ar de secagem, obtida de acordo com as condições do ar ambiente.

Para a primeira parte de secagem, nota-se na Tabela 3 que os tratamentos submetidos a  $T_{bs}$  de 40 °C resultaram em tempos de secagem que variaram de 9,8 a 16,75 horas, enquanto que, para  $T_{bs}$  de 35 °C essa variação foi menor, de 18 a 19,5 horas. Essa variação ocorrida nos tempos de secagem na primeira parte é resultado de diferentes condições do ar ambiente no momento da secagem de cada tratamento, sendo a  $T_{bs}$  e UR (umidade relativa) do ar ambiente fatores de maior influência.

Quanto a segunda parte de secagem, quando ocorreu o controle de UR do ar secagem pela  $T_{po}$  estipulada, notou-se que, independente da  $T_{bs}$  usada, menores  $T_{po}$  resultaram em menores tempos de secagem. O tratamento com  $T_{bs}$  de 40 °C e  $T_{po}$  de 2,6 °C (UR de 10%), proporcionou uma redução do tempo de secagem de 27% em relação ao tempo obtido pelo tratamento com  $T_{bs}$  de 40 °C e  $T_{po}$  de 10,8 °C (UR de 17,5%), 49% em relação ao tratamento com  $T_{bs}$  de 40 °C e  $T_{po}$  de 16,2 °C (UR de 25%) e 42% quando comparado ao tratamento com  $T_{bs}$  de 40 °C, sem controle de  $T_{po}$ . Para  $T_{bs}$  de 35 °C, a  $T_{po}$  de 2,6 °C proporcionou uma redução do tempo de secagem de 22% em relação ao tempo obtido pelo  $T_{po}$  de 10,8 °C (UR de 23,0%), 33% em relação a  $T_{po}$  de 16,2 °C (UR de 32,7%) e 22% quando comparado ao tempo gasto pelo tratamento com  $T_{bs}$  de 35 °C, sem controle de  $T_{po}$ . De forma geral, pode-se concluir que a  $T_{po}$  promoveu maior redução do tempo de secagem para  $T_{bs}$  de 40 °C quando comparado a redução ocorrida na  $T_{bs}$  de 35 °C.

Ainda na Tabela 3, observa-se que, maiores valores de tempo total de secagem foram obtidos pela menor combinação de  $T_{bs}$  (35 °C-35 °C) e maiores  $T_{po}$  (16,2 °C) do ar de secagem para cada combinação de  $T_{bs}$ .

O aumento da temperatura e redução da UR do ar de secagem promove maior gradiente de pressão de vapor d'água entre o ar de secagem e o produto, fazendo com que a água seja removida de forma mais rápida (ISQUIERDO et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2012).

Na Tabela 4 são apresentadas as taxas médias e máximas de redução de água em função da  $T_{bs}$  e da  $T_{po}$  do ar de secagem referente a secagem completa e segunda parte da secagem. A taxa média de redução de água foi calculada pela razão entre a perda de massa total durante o período de secagem e o tempo total de secagem.

Tabela 4 Tempo de secagem, valores médios e máximos de taxa de redução de água de café descascado em função da temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho.

Trat.	Primeira parte (meia seca)					Segunda parte (complementação)					
	T <sub>bs</sub> (°C)	UR <sup>+</sup> (%)	Taxa de redução		Tempo de secagem	T <sub>bs</sub> (°C)	T <sub>po</sub> (°C)	UR (%)	Taxa de redução		Tempo de
			Máx.	Méd.					Máx.	Méd.	
1	40	18,2	0,8188	0,1235	9,80	40	2,6	10,0	0,0294	0,0271	11,30
2	40	20,9	0,8114	0,0860	14,00	40	10,8	17,5	0,0283	0,0204	15,50
3	40	20,6	0,7327	0,0904	13,00	40	16,2	25,0	0,0275	0,0140	22,08
4	40	20,1	0,7320	0,0730	16,75	35	2,6	13,1	0,0266	0,0147	20,75
5	40	22,3	0,6846	0,0722	15,42	35	10,8	23,0	0,0251	0,0106	28,58
6	40	21,4	0,7408	0,0745	16,00	35	16,2	32,7	0,0240	0,0092	32,00
7	35	32,2	0,5849	0,0539	19,50	35	2,6	13,1	0,0267	0,0121	24,50
8	35	24,2	0,6455	0,0551	19,33	35	10,8	23,0	0,0259	0,0109	29,00
9	35	28,5	0,5791	0,0549	18,00	35	16,2	32,7	0,0244	0,0088	35,00
10	40	18,4	0,7897	0,1081	11,17	40	-	18,4 <sup>+</sup>	0,0257	0,0151	19,50
11	35	26,0	0,6884	0,0571	19,33	35	-	26,0 <sup>+</sup>	0,0149	0,0104	29,00

<sup>+</sup>Umidade relativa média do ar de secagem, obtida de acordo com as condições do ar ambiente.

Observa-se na Tabela 4 que, assim como o tempo de secagem, o aumento da temperatura de bulbo seco e a redução da umidade relativa, ocasionado pela redução da temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem, para uma mesma temperatura de bulbo seco, aumentam as taxas médias e máximas de redução de água da segunda parte da secagem. O mesmo padrão não foi observado na taxa máxima e média da primeira parte da secagem, uma vez que não ocorreu o controle das condições de  $T_{po}$ , e conseqüentemente cada tratamento foi exposto a condições diferentes do ar de secagem.

Analisando a primeira parte da secagem, os maiores valores de taxa máxima de redução de água ocorreram no início do processo, durante a primeira hora, sendo em média de  $0,7586 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para  $T_{bs}$  de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $0,6245 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para  $T_{bs}$  de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , quando os grãos apresentavam elevado teor de água. Após as primeiras horas de secagem, a taxa de redução de água dos grãos diminuiu radicalmente, independentemente da  $T_{bs}$  (FIGURAS 3A e 4A), devido a capacidade de deslocamento interno de água se tornar menor que a capacidade do ar de remover a água superficial do grão. No final da etapa, quando os cafés apresentam menores teores de água, observou-se valores aproximados de taxa de redução de água, independente do tratamento, indicados pela sobreposição das curvas (FIGURAS 3 e 4B). Em estudos anteriores, verificou-se o mesmo comportamento para diversos produtos agrícolas, como café descascado (RIBEIRO et al., 2003), feijão (RESENDE et al. 2008), feijão-adzuki (ALMEIDA et al., 2009), café cereja (RESENDE et al. 2010) e pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012).

Os maiores valores de taxa média de redução de água para primeira parte da secagem foram observados para  $T_{bs}$  de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (TABELA 4), sendo de  $0,1235 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  referente a UR de 18,2%,  $0,1081 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  referente a UR de 18,4% e  $0,0860 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  para UR de 20,9%. Menores valores foram obtidos com  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  de  $T_{bs}$ , sendo  $0,0539 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  o menor, referente a UR de 32,2%.

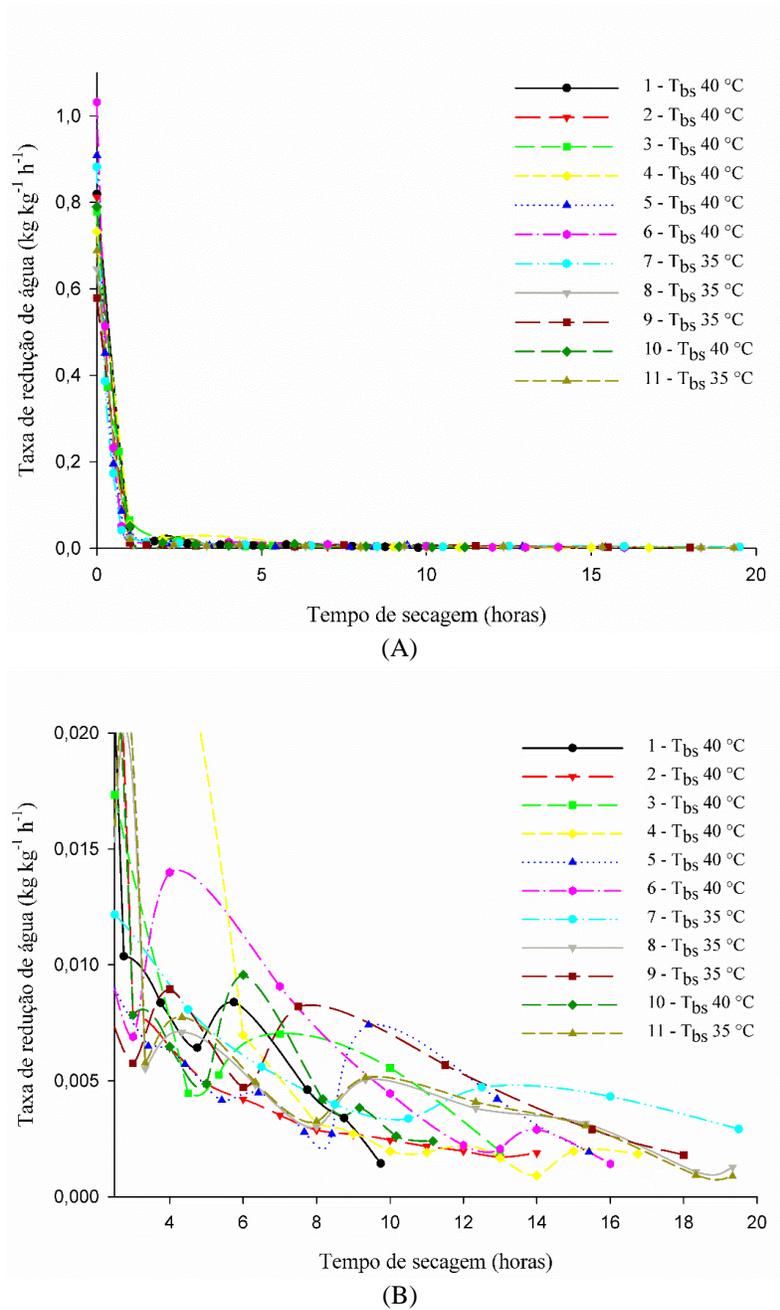
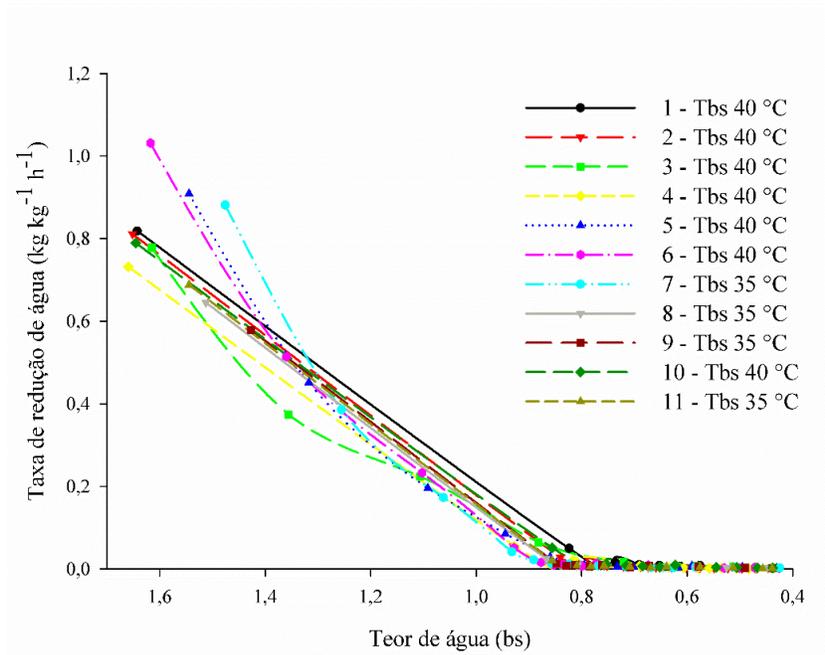
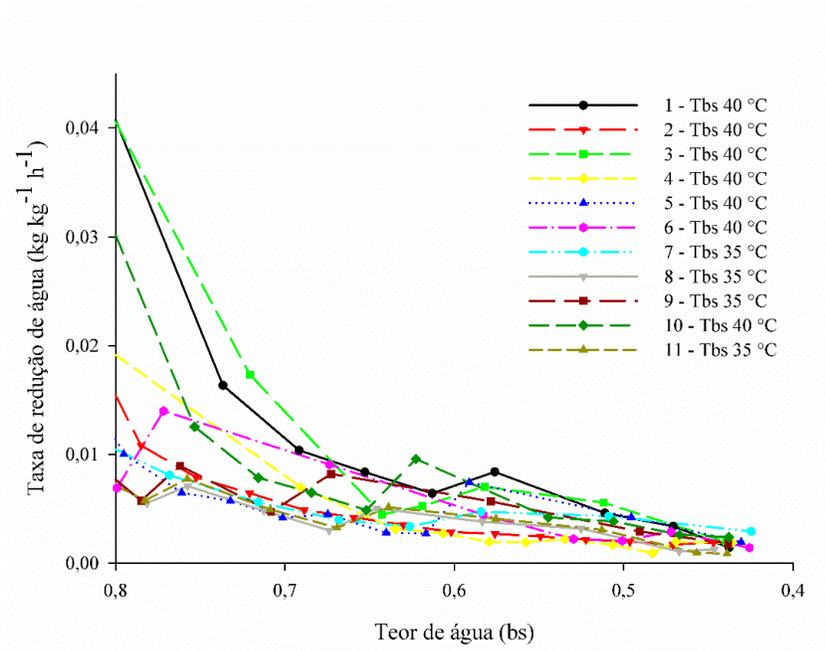


Figura 3 Taxa de redução de água em função do tempo de secagem dos grãos de café descascado durante a primeira parte da secagem. (A) Durante toda a primeira parte de secagem; (B) Após as 2,5 primeiras horas de secagem.



(A)



(B)

(Continua)

(Conclusão)

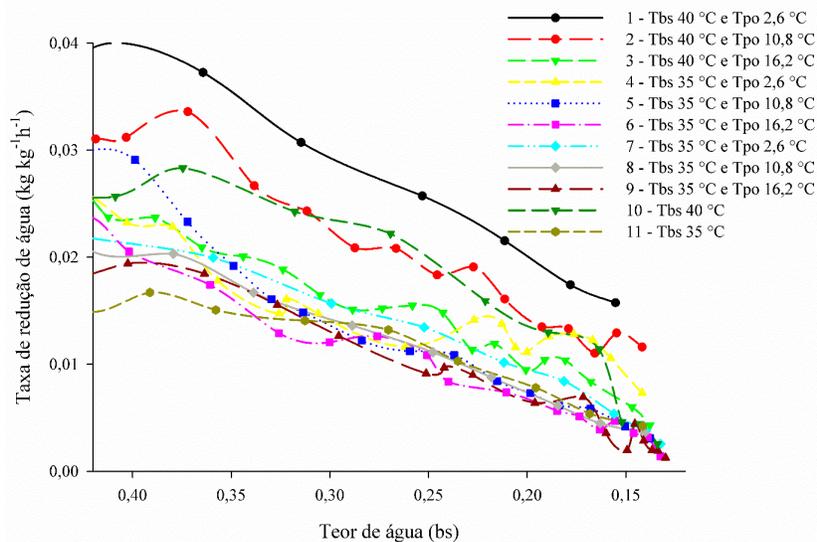


Figura 4 Taxa de redução de água em função do teor de água para os grãos de café descascado: (A) durante toda a primeira parte; (B) de 0,8 b.s. até o final da primeira parte; (C) após meia seca (segunda parte).

Ao estudar a segunda parte da secagem isoladamente, observamos que o comportamento das taxas de redução de água máximas e médias não é o mesmo, sendo os maiores valores observados para T<sub>bs</sub> maiores e T<sub>po</sub> menores, decorrente da maior diferença entre a pressão parcial de vapor d'água do ar de secagem e do produto. Desta maneira, os maiores valores máximos e médios foram de 0,0294 e 0,0271 kg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> respectivamente, referente a T<sub>bs</sub> de 40 °C e T<sub>po</sub> de 2,6 °C (UR de 10,0%), enquanto os menores foram de 0,0244 e 0,0088 kg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, referente a T<sub>bs</sub> de 35 °C e T<sub>po</sub> de 16,2 °C (UR de 32,7%).

Apesar de no final da secagem as taxas de redução de água se tornarem parecidas e tenderem a se igualar, as taxas finais referentes a T<sub>po</sub> 2,6 °C foram maiores para todas as combinações de T<sub>bs</sub> (FIGURA 4 C). Porém, a T<sub>bs</sub> mais elevada, ocasionou maiores diferenças de taxas entre as T<sub>po</sub> usadas, podendo ser

um indício de que a  $T_{po}$  interaja de forma mais intensa com temperaturas mais elevadas.

Pelas Figuras 3 e 4, nota-se que, oscilações na taxa de redução de água ocorreram durante todo o processo, sendo maiores durante a primeira metade. Durante a segunda metade, após 0,428 b.s., as oscilações foram menores devido ao controle da  $T_{po}$  e conseqüentemente da UR do ar de secagem. A primeira parte da secagem foi realizada em diferentes intervalos de tempo para cada tratamento, variando de 9,8 a 19,5 horas, sendo o produto exposto a diferentes condições de UR do ar de secagem durante esse tempo, o que explicaria essas oscilações maiores quando comparado a segunda metade.

#### **4.2 Ajuste de modelos matemáticos**

Nas Tabelas 5 e 6 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 descascados (Tabela 2), com teor de água inicial médio de  $1,565 \pm 0,065$  b.s., quando submetidos às condições de temperatura de bulbo seco e temperatura do ponto de orvalho do ar de secagem empregadas neste experimento, para a primeira e segunda parte da secagem. São apresentados os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e tendência de distribuição dos resíduos. A escolha de um modelo para representar o fenômeno da secagem de um produto agrícola se baseia na análise conjunta desses parâmetros apresentados, bem como o comportamento da distribuição de resíduos, sendo que, a análise de um único parâmetro não constitui uma boa ferramenta para a seleção de modelos não lineares.

Tabela 5 Parâmetros estatísticos obtidos para os modelos de secagem utilizados para descrever a cinética de secagem dos grãos de café, referente a primeira parte da secagem.

TR	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE
1	Aproximação da Difusão	99,98	0,010	0,84	A	Dois Termos	99,98	0,006	0,85	T	Exponencial de dois termos	67,02	0,380	28,68	T
2		99,98	0,010	0,68			99,98	0,006	0,68			50,26	0,484	26,98	
3		99,33	0,062	2,48			78,90	0,201	21,15			73,81	0,388	25,89	
4		99,99	0,009	0,60			99,98	0,005	0,60			63,08	0,430	21,52	
5		99,28	0,066	2,57			99,33	0,037	2,59			52,17	0,533	25,18	
6		99,15	0,074	2,79			99,20	0,042	2,81			38,85	0,632	36,07	
7		99,49	0,053	2,21			75,82	0,211	12,62			38,40	0,584	27,99	
8		99,96	0,014	0,94			99,96	0,008	0,94			48,11	0,467	26,98	
9		99,93	0,016	1,02			99,93	0,009	1,02			39,86	0,474	28,05	
10		99,90	0,021	1,62			99,90	0,012	1,62			64,98	0,396	27,45	
11		99,97	0,011	0,78			99,97	0,007	0,77			47,93	0,475	28,38	
1	Henderson e Pabis	69,70	0,365	22,13	T	Henderson e Pabis Modificado	69,70	0,163	22,13	T	Lewis	49,98	0,468	35,91	T
2		67,10	0,394	15,61			67,10	0,176	15,61			27,07	0,586	33,58	
3		78,90	0,349	21,15			99,38	0,027	2,51			60,56	0,477	31,69	
4		75,65	0,349	13,71			75,65	0,156	13,71			47,62	0,512	25,64	
5		76,02	0,377	14,25			99,71	0,019	1,39			32,44	0,634	30,00	
6		73,19	0,419	15,40			99,36	0,029	2,24			13,90	0,751	43,62	
7		75,82	0,366	12,62			99,70	0,018	1,23			14,99	0,686	32,47	
8		69,45	0,358	14,31			99,99	0,001	0,17			24,55	0,563	33,46	
9		68,47	0,344	12,85			68,47	0,154	12,85			11,75	0,575	34,55	
10		70,63	0,363	19,79			99,99	0,154	12,85			47,01	0,487	34,47	
11		68,83	0,368	15,06			100,00	0,000	0,06			24,87	0,571	35,17	
1	Midilli	92,21	0,185	9,74	T	Midilli Modificado	99,95	0,015	1,04	T	Newton	49,98	0,468	35,91	T
2		99,73	0,036	2,30			99,98	0,004	0,17			27,07	0,586	33,58	
3		97,29	0,125	6,85			97,26	0,126	6,76			60,56	0,477	31,69	
4		68,29	0,399	31,46			99,93	0,019	0,92			47,62	0,512	25,64	
5		96,11	0,152	5,77			96,10	0,153	5,71			32,44	0,634	30,00	
6		95,99	0,162	6,42			95,97	0,162	6,36			13,90	0,751	43,62	
7		96,47	0,140	5,52			96,46	0,140	5,47			14,99	0,686	32,47	
8		99,99	0,005	0,22			99,99	0,005	0,22			24,55	0,563	33,46	
9		50,31	0,431	27,10			99,99	0,004	0,19			11,75	0,575	34,55	
10		90,23	0,209	8,15			99,90	0,022	1,43			47,01	0,487	34,47	
11		98,93	0,068	2,97			99,99	0,005	0,33			24,87	0,571	35,17	

(Continua)

(Tabela 5, conclusão)

TR	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE
1		99,64	0,040	3,42			94,11	0,161	11,82			96,00	0,076	9,80	
2		98,91	0,072	4,63			89,90	0,218	10,98			90,86	0,120	10,09	
3		96,33	0,145	6,94			95,52	0,161	9,74			96,51	0,082	8,95	
4		99,40	0,055	4,18			93,10	0,186	8,94			92,94	0,109	11,12	
5	Page	96,09	0,153	5,67		Thompson	91,67	0,223	9,60		Valcam	91,34	0,131	9,87	
6		95,94	0,163	6,05	T		89,78	0,259	13,08	T		89,69	0,150	12,04	T
7		96,37	0,142	6,11			89,86	0,237	10,22			89,77	0,137	10,33	
8		98,27	0,085	5,55			90,00	0,205	10,59			89,78	0,120	9,53	
9		97,79	0,091	5,68			89,11	0,202	10,70			88,77	0,118	11,14	
10		99,28	0,057	4,55			93,73	0,167	10,83			94,85	0,088	9,94	
11		98,11	0,090	6,04			89,60	0,212	11,16			88,86	0,127	10,32	
1		69,70	0,258	22,13			59,31	0,244	27,76						
2		67,10	0,278	15,61			39,61	0,308	27,15						
3		78,90	0,246	21,15			62,50	0,268	27,49						
4	Verma	75,65	0,247	13,71		Wang & Sing	52,89	0,280	21,95		T				
5		76,03	0,267	14,25			34,87	0,359	27,06						
6		73,19	0,296	15,40	T		20,12	0,417	35,51	T					
7		75,82	0,259	12,62			18,26	0,388	29,92						
8		69,45	0,253	14,31			36,72	0,298	27,18						
9		68,47	0,243	12,85			23,14	0,310	28,94						
10		70,63	0,256	19,79			57,51	0,252	26,63						
11		68,83	0,260	15,06			34,79	0,307	28,73						

TR= tratamento; M= modelo; TE= tendência; T= tendenciosa; A= aleatória.

Tabela 6 Parâmetros estatísticos obtidos para os modelos de secagem utilizados para descrever a cinética de secagem dos grãos de café, durante a segunda parte da secagem (após meia seca).

TR	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P.(%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P.(%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P.(%)	TE
1	Aproximação por Difusão	99.98	0.013	1.01	T	Dois Termos	99.43	0.039	5.38	T	Exponencial de dois termos	99.16	0.081	6.51	T
2		99.96	0.022	1.25			99.70	0.035	3.47			99.96	0.023	1.32	
3		99.98	0.017	0.85			99.88	0.022	2.07			99.86	0.042	2.40	
4		99.56	0.073	4.88			99.27	0.054	6.60			99.23	0.098	6.75	
5		99.99	0.013	0.64			99.99	0.007	0.65			99.89	0.036	2.12	
6		99.98	0.014	0.82			99.93	0.017	1.88			99.98	0.017	0.77	
7		99.97	0.015	1.71			99.87	0.018	2.54			99.95	0.020	2.26	
8		99.99	0.011	0.67			99.98	0.009	1.38			99.98	0.014	1.17	
9		99.94	0.030	1.43			99.96	0.014	1.23			99.86	0.043	3.05	
10		99.65	0.055	5.30			99.56	0.036	5.48			99.48	0.068	5.58	
11		99.99	0.010	0.80			99.52	0.037	4.92			99.22	0.082	6.58	
1	Henderson e Pabis	99.43	0.067	5.38	T	Henderson e Pabis Modificado	99.43	0.030	5.38	T	Lewis	99.16	0.081	6.51	T
2		99.70	0.060	3.47			99.70	0.027	3.47			99.44	0.081	4.84	
3		99.88	0.038	2.07			99.88	0.017	2.07			99.86	0.042	2.40	
4		99.27	0.094	6.60			99.27	0.042	6.60			99.23	0.098	6.75	
5		99.78	0.050	2.29			99.99	0.006	0.65			99.52	0.074	4.11	
6		99.93	0.030	1.88			99.99	0.005	0.58			99.88	0.040	2.60	
7		99.87	0.032	2.54			99.87	0.014	2.54			99.83	0.037	2.87	
8		99.98	0.015	1.38			99.98	0.007	1.38			99.98	0.015	1.37	
9		99.82	0.050	4.55			99.96	0.010	1.23			99.82	0.050	4.47	
10		99.56	0.062	5.48			99.56	0.028	5.48			99.48	0.068	5.58	
11		99.52	0.064	4.92			99.52	0.029	4.92			99.22	0.082	6.58	
1	Midilli	100.00	0.006	0.34	A	Midilli Modificado	100.00	0.006	0.37	A	Newton	99.16	0.081	6.51	T
2		99.98	0.016	0.80			99.98	0.017	0.83			99.44	0.081	4.84	
3		99.99	0.013	0.72			99.99	0.014	0.73			99.86	0.042	2.40	
4		99.97	0.020	1.24			99.97	0.020	1.23			99.23	0.098	6.75	
5		99.98	0.016	0.83			99.98	0.016	0.81			99.52	0.074	4.11	
6		99.99	0.013	0.69			99.99	0.013	0.68			99.88	0.040	2.60	
7		99.99	0.011	1.08			99.99	0.011	1.08			99.83	0.037	2.87	
8		99.99	0.008	0.40			99.99	0.008	0.38			99.98	0.015	1.37	
9		99.98	0.015	0.81			99.98	0.015	0.80			99.82	0.050	4.47	
10		99.97	0.016	1.17			99.97	0.017	1.19			99.48	0.068	5.58	
11		99.99	0.010	0.65			99.99	0.011	0.68			99.22	0.082	6.58	

(Continua)

(Tabela 6, conclusão)

TR	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE	M	R <sup>2</sup> (%)	SE	P (%)	TE			
1		99,98	0,013	1,06			99,93	0,024	1,27			99,98	0,007	0,84				
2		99,96	0,022	1,33			99,94	0,026	0,86			99,95	0,014	1,09				
3		99,96	0,023	1,20			99,99	0,014	0,73			99,99	0,006	0,55				
4		99,48	0,080	5,30			99,76	0,055	3,07			99,97	0,011	1,21				
5	Page	99,97	0,020	1,08			99,90	0,036	2,10			99,97	0,011	0,98				
6		99,99	0,013	0,69	T	Thompson	99,98	0,017	0,77	T	Valcam	99,99	0,007	0,58	A			
7		99,96	0,018	2,07			99,92	0,025	2,68			99,99	0,004	0,49				
8		99,98	0,015	1,35			99,98	0,014	1,19			99,98	0,007	1,10				
9		99,83	0,048	4,00			99,86	0,044	3,14			99,95	0,016	1,62				
10		99,56	0,063	5,88			99,49	0,067	5,72			99,94	0,013	2,02				
11		99,98	0,013	1,16			99,82	0,039	2,96			99,98	0,007	1,10				
1			99,43	0,047	5,38				99,96	0,011		0,71						
2			99,70	0,042	3,47				99,94	0,016		1,41						
3			99,88	0,027	2,07				99,89	0,021		1,75						
4		Verma	99,27	0,067	6,60				99,62	0,040		3,67						
5	99,78		0,035	2,29				98,69	0,071	6,85								
6	99,93		0,021	1,88	T	Wang & Sing	99,47	0,047	5,47	T								
7	99,87		0,022	2,54			99,98	0,007	1,05									
8	99,98		0,011	1,38			99,80	0,025	3,79									
9	99,82		0,035	4,55			99,74	0,034	4,75									
10	99,56		0,044	5,48			99,91	0,016	2,13									
11	99,52		0,045	4,92			99,93	0,014	1,50									

TR= tratamento; M= modelo; TE= tendência; T= tendenciosa; A= aleatória.

Segundo Kashaninejad et al. (2007) e Madamba et al. (1996), coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 95% indicam uma representação satisfatória do processo de secagem. Já Draper e Smith (1998) afirmam que a capacidade de um modelo descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa (SE). Logo, quanto menor o valor do SE, melhor o ajuste do modelo aos dados experimentais de razão de teor de água (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 primeira parte da secagem dos grãos de café (Tabela 5), percebe-se que os modelos de Aproximação da Difusão, Midilli Modificado e Page alcançaram os requisitos desejados para os três parâmetros estatísticos analisados. Dentre os modelos que alcançaram os três requisitos, o de Aproximação por Difusão foi o que apresentou os maiores valores de  $R^2$  ( $R^2 \geq 99,15\%$ ) e menores valores de P ( $P \leq 2,79\%$ ) e SE ( $SE \leq 0,074$ ).

Quando mais de um modelo representa de forma satisfatória o fenômeno da secagem, torna-se necessário considerar a complexidade de cada modelo, para a sua recomendação. A análise de distribuição dos resíduos é outra ferramenta que tem sido constantemente utilizada de forma complementar aos parâmetros estatísticos na escolha do modelo, pois mesmo que subjetiva, fornece boa indicação do ajuste do modelo aos valores experimentais. Para Goneli et al. (2011), um modelo é considerado aleatório se os valores residuais se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero e também não formarem figuras definidas, não indicando tendenciosidade dos resultados. Se apresentar distribuição tendenciosa, o modelo é considerado inadequado para representar o fenômeno em questão. Desta forma, dentre os modelos que alcançaram os

requisitos estatísticos, o modelo de Aproximação da Difusão foi o único que obteve uma distribuição de resíduos aleatória.

Quando estudado apenas a segunda parte da secagem (Tabela 6), nota-se que todos os modelos empregados neste trabalho atendem os requisitos de  $R^2$ , P e SE. Todos os modelos apresentaram coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 99,15%. Ao se considerar o critério do erro médio relativo ( $P < 10\%$ ) e o desvio padrão da estimativa (SE) para um ajuste aceitável, todos valores são inferiores a 6,75% e 0,0943 respectivamente. Os modelos de Midilli e Midilli Modificado foram os que resultaram em melhores ajustes, sendo, os maiores valores de coeficiente de determinação ( $R^2 \geq 99,97\%$ ) e os menores valores de erro médio relativo e desvio padrão da estimativa ( $P \leq 1,24\%$  e  $SE \leq 0,020$ ). Quanto a tendência de distribuição dos resíduos, os modelos de Midilli, Midilli Modificado e de Valcam foram os únicos a apresentar aleatoriedade.

Entre os modelos utilizados neste experimento para descrever a cinética de secagem do café descascado submetidos a diferentes combinações de  $T_{bs}$  e  $T_{po}$ , o de Aproximação da Difusão foi o que apresentou os melhores ajustes para primeira parte da secagem, após uma análise conjunta dos valores do coeficiente de determinação, erro médio relativo, desvio padrão da estimativa e tendência de distribuição dos resíduos. Para a segunda parte da secagem, os modelos de Midilli e Midilli Modificado foram os que apresentaram um ajuste mais adequado, sendo indicado o modelo de Midilli modificado devido sua menor complexidade.

Isquierdo et al. (2013), estudando 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 descreve o processo. O mesmo foi verificado por Corrêa et al. (2010), que obtiveram um ajuste satisfatório do modelo de Midilli Modificado para descrever a secagem de frutos de café. Goneli et al. (2009) e Alves (2013), estudaram a cinética de

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

Além do café em suas diferentes formas de processamento, o modelo de Midilli também é recomendado para prever o fenômeno de secagem de outros produtos agrícolas, como feijão-vermelho (CORRÊA et al. 2007), feijão-adzuki (RESENDE et al., 2010) e grãos de pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012).

Nas Figuras 5 e 6, são apresentadas a comparação entre valores observados e estimados da razão de umidade pelos modelos de Aproximação da Difusão e Midilli Modificado, para primeira e segunda parte da secagem respectivamente. Observa-se, nessas figuras, uma elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os valores estimados pelos modelos de Aproximação da Difusão e Midilli Modificado para todas as condições estudadas, o que confirma o ajuste satisfatório desses modelos para descrever a cinética de secagem dos grãos de café, nas condições estudadas.

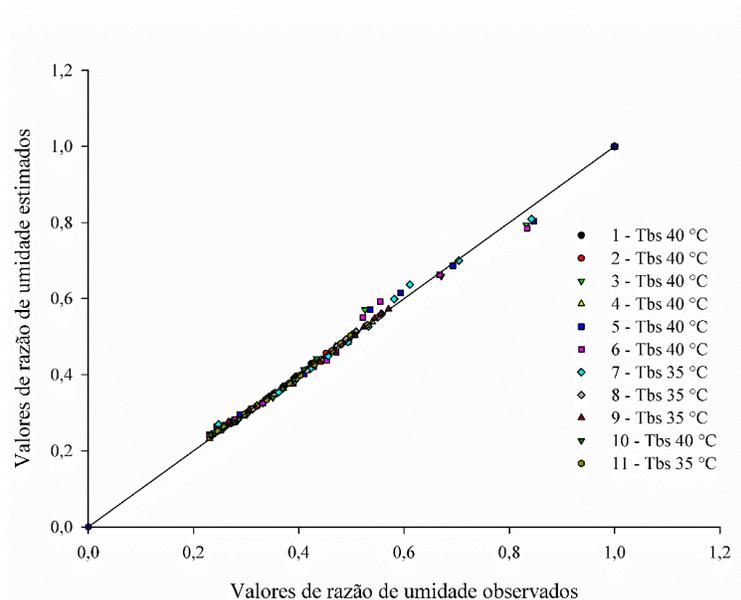


Figura 5 Valores de razão de umidade (adimensional) observados e estimados pelo modelo de Aproximação da Difusão para primeira parte da secagem de grãos de café.

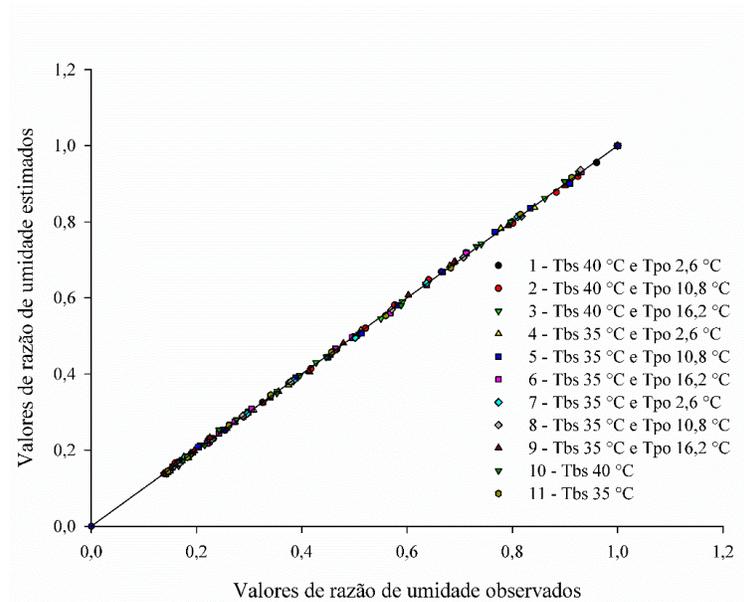


Figura 6 Valores de razão de umidade (adimensional) observados e estimados pelo modelo de Midilli Modificado para a secagem de grãos de café após meia seca (segunda parte da secagem).

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os coeficientes dos modelos de Aproximação da difusão, para primeira parte da secagem do café descascado, e os coeficientes do modelo de Midilli Modificado para a segunda parte da secagem do café descascado, ajustados aos dados observados da cinética de secagem em camada fina, nas condições consideradas neste experimento.

Tabela 7 Coeficientes do modelo de Dois Termos ajustados aos dados observados da cinética de secagem durante toda a secagem dos grãos de café descascados.

Tratamento	T <sub>bs</sub> (°C)	UR <sup>+</sup> (%)	Modelo de Aproximação da Difusão <sup>1</sup>		
			RU = (a(exp(-k t)))+(1-a)exp(-k b t)		
			a	k	b
1	40	18,2	0,517696	2,862447	0,025116
2	40	20,9	0,493553	4,367485	0,011951
3	40	20,6	0,445483	0,044927	29,85704
4	40	20,1	0,482458	2,362937	0,020341
5	40	22,3	0,458232	2,142943	0,021837
6	40	21,4	0,467904	2,364888	0,020773
7	35	32,2	0,419978	2,321288	0,016976
8	35	24,2	0,438156	3,841785	0,010160
9	35	28,5	0,402894	7,609619	0,005629
10	40	18,4	0,496737	2,933963	0,022305
11	35	26,0	0,447693	6,398029	0,006362

<sup>+</sup>Umidade relativa média do ar de secagem, obtida de acordo com as condições do ar ambiente. <sup>1</sup>Kassem (1998).

Tabela 8 Coeficientes do modelo de Midilli modificado ajustados aos dados observados da cinética de secagem após meia seca (segunda parte da secagem) dos grãos de café descascados.

Tratamento	T <sub>bs</sub> (°C)	T <sub>po</sub> (°C)	UR (%)	Modelo de Midilli modificado <sup>1</sup>		
				RU = exp(-k t <sup>n</sup> )+a t		
				k	n	a
1	40	2,6	10,0	0,096869	1,148387	-0,00338
2	40	10,8	17,5	0,081624	1,088685	-0,00215
3	40	16,2	25,0	0,072000	1,001071	-
4	35	2,6	13,1	0,072791	0,806539	-
5	35	10,8	23,0	0,097202	0,874404	-
6	35	16,2	32,7	0,072015	0,951352	0,000126
7	35	2,6	13,1	0,061757	1,121226	0,001283
8	35	10,8	23,0	0,066940	1,034742	0,000913
9	35	16,2	32,7	0,053817	1,093632	0,001860
10	40	-	18,4 <sup>+</sup>	0,075456	1,239908	0,006055
11	35	-	26,0 <sup>+</sup>	0,038652	1,192088	0,000578

<sup>+</sup>Umidade relativa média do ar de secagem, obtida de acordo com as condições do ar ambiente. <sup>1</sup>Ghazanfari et al. (2006).

Pela Tabela 7, não se observa nenhum padrão da constante “k” e dos coeficientes “a” e “b”. Na Tabela 8, verifica-se que a magnitude da constante de secagem “k”, que representa o efeito das condições externas de secagem (GONELI et al., 2009), aumentou com a elevação da temperatura de secagem ( $T_{bs}$ ), indicando que a taxa de redução de água se eleva com o aumento da temperatura. Segundo Babalis e Belessiotis (2004) e Madamba, Driscoll e Buckle (1996), a constante de secagem “k” está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem para o período decrescente. Quanto aos coeficientes “n” e “a” do modelo de Midilli Modificado, não se observou uma tendência definida dos seus valores em função da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem.

Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os comportamentos da razão de umidade dos grãos de café, estimados pelos modelos de Aproximação da difusão e Midilli Modificado para todas as condições estudadas. Observa-se a elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os valores estimados pelos modelos, o que confirma o ajuste satisfatório desses modelos para descrever a cinética para cada condição estudada.

Pela Figura 7, nota-se que o início da secagem, referente aos primeiros minutos, ocorreu sob período de taxa constante, devido ao alto teor da água dos grãos. Após os primeiros minutos, a secagem se deu sob o período de taxa decrescente. Durante esse período, as resistências às transferências de água e energia encontram-se essencialmente no interior dos grãos, tornando a taxa de evaporação superficial superior à taxa de deslocamento de água do interior para a superfície do produto (BROOKER et al., 1992).

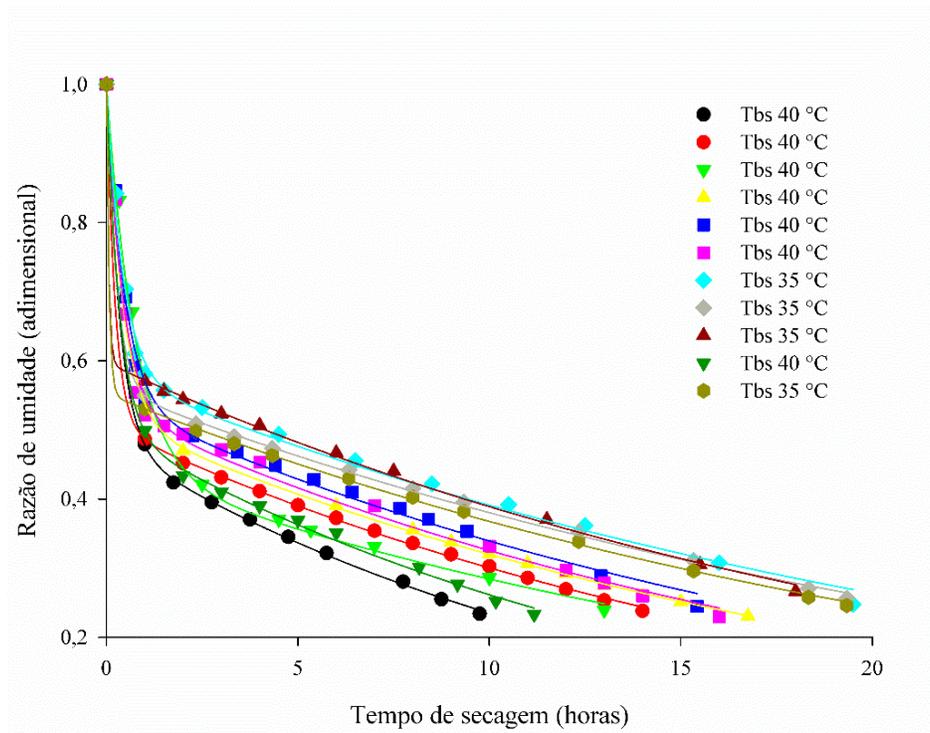


Figura 7 Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Aproximação da Difusão para a primeira parte da secagem do café descascado, em função do tempo de secagem.

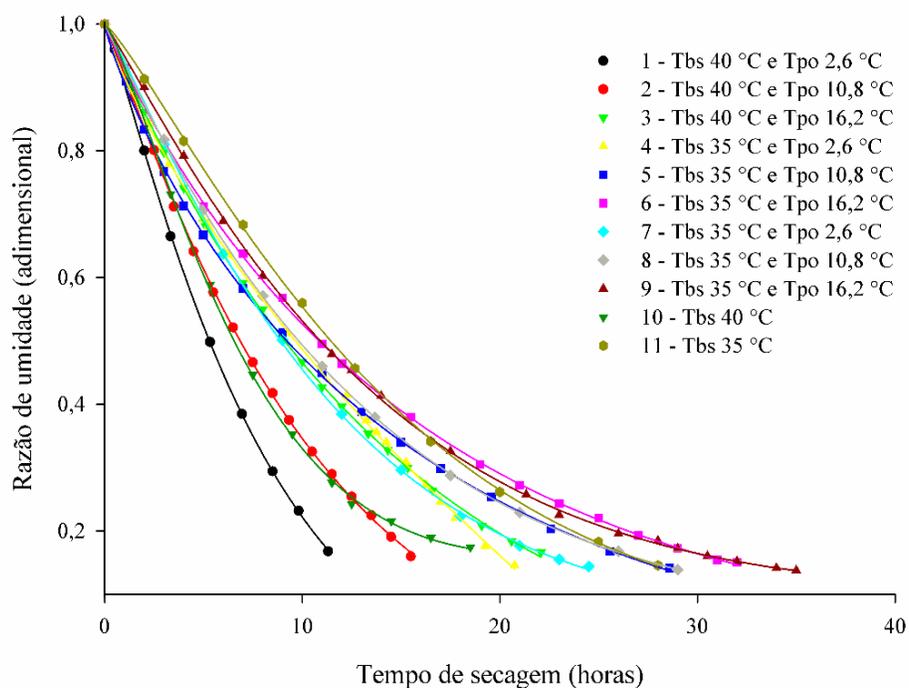


Figura 8 Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli Modificado para segunda parte da secagem do café descascado, em função do tempo de secagem.

Observando o gráfico da primeira parte da secagem (FIGURA 7), nota-se que os tratamentos que iniciaram a secagem com  $T_{bs}$  de 40 °C obtiveram maior perda de água nas primeiras horas de secagem, entretanto, alguns tratamentos que após meia seca passaram à condição de  $T_{bs}$  de 35 °C (segunda parte da secagem), tiveram tempos totais de secagem (TABELA 3) superiores aos tempos de alguns tratamentos que iniciaram e terminaram a secagem com  $T_{bs}$  de 35 °C. Esse fato pode ser observado para o tratamento 5 (primeira parte  $T_{bs}$  40 °C - segunda parte  $T_{bs}$  35 °C e  $T_{po}$  10,8 °C), que apesar de começar o processo com  $T_{bs}$  de 40 °C, obteve um tempo total de secagem igual ao tratamento 7 (primeira parte  $T_{bs}$  35 °C

- segunda parte  $T_{bs}$  35 °C e  $T_{po}$  2,6 °C), que iniciou o processo com  $T_{bs}$  de 35 °C. O mesmo ocorreu para o tratamento 6 (primeira parte  $T_{bs}$  40 °C - segunda parte  $T_{bs}$  35 °C e  $T_{po}$  16,2 °C), que obteve tempo total de secagem superior ao tratamentos 7 e igual ao tratamento 8 (primeira parte  $T_{bs}$  35 °C - segunda parte  $T_{bs}$  35 °C e  $T_{po}$  10,8 °C). Nesses casos, a  $T_{po}$  mais baixa, promove maiores taxas de redução de água no final da secagem, quando a retirada de água se torna mais difícil devido a mecanismos internos dos grãos, tornando o processo mais rápido. Desta forma, para essas condições, o efeito da  $T_{po}$  no final da secagem se torna maior quando comparado ao efeito da  $T_{bs}$  no início da secagem.

Analisando a Figura 8, referente a segunda parte da secagem, a secagem sob as condições,  $T_{bs}$  de 40 °C sem controle de  $T_{po}$  (tratamento 10, UR média monitorada de 18,4%) e  $T_{bs}$  de 40 °C e  $T_{po}$  de 10,8 °C (tratamento 2, UR de 17,5%), ocorreram de forma semelhante durante o final da secagem, porém, por volta do valor 0,24 de razão de umidade, o tratamento sem controle de  $T_{po}$  (tratamento 10) passou a ter menores taxas de redução de água, provavelmente devido maiores oscilações da UR do ar de secagem, resultando em um tempo total de secagem (TABELA 3) superior ao tratamento com  $T_{po}$  de 10,8 °C (tratamento 2). Quando analisamos os tratamentos com 5 e 8, ambos submetidos a  $T_{bs}$  de 35 °C e  $T_{po}$  de 10,8 °C (UR de 23,0%), mais o seu equivalente sem controle de  $T_{po}$  (tratamento 11; UR média monitorada de 26,0%), notamos que as oscilações entre as taxas de redução de água foram menores durante a parte final, resultando em tempos de secagem praticamente iguais.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios do raio equivalente e dos coeficientes de difusão efetivos obtidos para a secagem de grãos de café, para as diferentes combinações de temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho utilizadas nesse experimento.

Tabela 9 Valores de raio equivalente ( $R_{eq}$ ) e coeficiente de difusão efetivo ( $D_{eff}$ ) dos grãos de café descascados, em função das combinações temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e temperatura de ponto de orvalho ( $T_{po}$ ) do ar de secagem, para primeira e segunda parte da secagem.

Tratamento	$R_{eq} \times 10^{-3}$	Primeira parte			Segunda parte			
		$T_{bs}$	UR <sup>+</sup>	$D_{eff} \times 10^{-11}$	$T_{bs}$	$T_{po}$	UR	$D_{eff} \times 10^{-11}$
1	6,89	40	18,2	1,8459	40	2,6	10,0	3,2973
2	6,77	40	20,9	1,1556	40	10,8	17,5	2,3963
3	6,88	40	20,6	1,4740	40	16,2	25,0	1,8004
4	6,97	40	20,1	0,9883	35	2,6	13,1	1,9592
5	6,99	40	22,3	1,1189	35	10,8	23,0	1,8158
6	7,03	40	21,4	1,2575	35	16,2	32,7	1,6932
7	6,89	35	32,2	0,8401	35	2,6	13,1	2,1459
8	6,94	35	24,2	0,8198	35	10,8	23,0	1,7543
9	6,94	35	28,5	0,8859	35	16,2	32,7	1,7059
10	6,83	40	18,4	1,5002	40	-	18,4 <sup>+</sup>	2,6755
11	6,90	35	26,0	0,8631	35	-	26,0 <sup>+</sup>	1,4934
CV				19,16%				18,07%

<sup>+</sup>Umidade relativa média do ar de secagem, obtida de acordo com as condições do ar ambiente. \*Significativo a 5% pelo teste F.

Os resultados proporcionados pela análise de variância, evidenciaram que a temperatura do ar de secagem e a temperatura de ponto de orvalho e, conseqüentemente, a umidade relativa do ar tiveram efeito significativo tanto no coeficiente de difusividade efetivo da primeira parte da secagem quanto no coeficiente de difusividade efetivo da segunda parte da secagem.

Pela Tabela 9, observa-se que, para primeira parte da secagem dos grãos descascados de café, os valores do coeficiente de difusividade efetiva foram maiores para os tratamentos que iniciaram o processo com  $T_{bs}$  maiores. Analisando apenas a segunda parte da secagem (após meia seca), o aumento da temperatura de bulbo seco e a redução da temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem para a uma mesma temperatura de bulbo seco, aumentam os valores do coeficiente de difusão efetivo. No entanto, maiores diferenças entre os coeficientes obtidos por cada  $T_{po}$ , foram observadas quando utilizada a  $T_{bs}$  de 40 °C.

Ainda na Tabela 9, verificou-se um aumento linear do coeficiente de difusão em função da redução da  $T_{po}$ , sendo os valores obtidos na ordem de 1,80 a  $3,29 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para  $T_{bs}$  de 40 °C e de 1,69 a  $2,14 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para  $T_{bs}$  de 35 °C.

O padrão verificado no comportamento do coeficiente de difusão é determinado por alguns fatores e explicado por outros autores. Corrêa et al. (2010), afirmam 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).

O efeito da temperatura de ponto de orvalho, conseqüentemente da umidade relativa do ar de secagem no coeficiente de difusão pode também ser

explicado pelo mecanismo interno de difusão de vapor, devido ao maior gradiente de pressão parcial de vapor (BROOKER et al., 1992). Os valores obtidos neste trabalho apresentam mesmo padrão que os obtidos por Isquierdo et al. (2013), trabalhando com café natural, que também observaram maiores valores do coeficiente para maiores  $T_{bs}$  e menores  $T_{po}$ , conseqüentemente menores umidades relativas. Alves et al. (2013), trabalhando com baixas umidades relativas e diferentes temperaturas do ar de secagem, obtiveram coeficientes de  $1,908 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para combinação de  $T_{bs}-T_{po}$  de  $35 \text{ }^\circ\text{C}-2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $2,456 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para  $T_{bs}-T_{po}$  de  $40 \text{ }^\circ\text{C}-2,6 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $3,721 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para combinação de  $T_{bs}-T_{po}$  de  $45 \text{ }^\circ\text{C}-2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Os valores do coeficiente de difusão efetivo obtidos neste experimento, estão de acordo com os valores encontrados para produtos agrícolas, que segundo Madamba et al. (1996), apresentam-se na faixa de  $10^{-11}$  a  $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Corrêa et al. (2010) estudaram a cinética de secagem de frutos de café para as temperaturas de 35, 45 e 55  $^\circ\text{C}$  e obtiveram coeficientes de difusão efetivos de  $2,99 \times 10^{-11}$ ,  $2,39 \times 10^{-11}$  e  $5,98 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  respectivamente. A difusividade efetiva dos grãos de guandu variou de  $2,1 \times 10^{-10}$  a  $6,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , para o intervalo de temperatura de 40 a 70  $^\circ\text{C}$ , em trabalho realizado por Silva et al. (2014). Para pinhão manso, segundo Siqueira et al. (2012), temperaturas mais elevadas resultaram em maiores coeficientes de difusão, variando entre  $9,29 \times 10^{-10}$  e  $41,48 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para grãos e,  $16,20 \times 10^{-10}$  e  $68,11 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para frutos.

### 4.3 Análise sensorial

Os resultados da análise sensorial dos cafés submetidos ao processamento via úmida, submetidos a diferentes tratamentos de secagem foram analisados por meio de teste de médias (Scott-knott), a 5% de significância e estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 Aspectos sensoriais da bebida dos grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.

T	T <sub>bs-pp-sp</sub> (°C-°C)	T <sub>po-sp</sub> (°C)	TS (h)	F/A	SA	AC	CO	FL	EQ	FI	TOT
1	40-40	2,6	21,10	7,50 a	7,83 a	7,83 a	7,83 a	7,67 b	7,50 a	7,50 b	83,7 c
2	40-40	10,8	29,50	7,50 a	7,67 b	7,50 a	7,83 a	7,50 b	7,50 a	7,50 b	83,0 c
3	40-40	16,2	35,08	7,67 a	8,00 a	8,00 a	8,00 a	8,00 a	7,83 a	8,00 a	85,5 a
4	40-35	2,6	37,50	7,50 a	7,83 a	7,67 a	7,83 a	7,50 b	7,50 a	7,50 b	83,3 c
5	40-35	10,8	44,00	7,67 a	8,00 a	7,83 a	8,00 a	8,00 a	8,00 a	8,00 a	85,5 a
6	40-35	16,2	48,00	7,50 a	7,83 a	8,00 a	8,00 a	8,00 a	7,50 a	7,67 b	84,5 b
7	35-35	2,6	44,00	7,50 a	8,00 a	7,83 a	8,00 a	8,00 a	7,67 a	7,50 b	84,5 b
8	35-35	10,8	48,33	7,50 a	7,50 b	7,67 a	7,83 a	8,00 a	7,50 a	7,50 b	83,3 c
9	35-35	16,2	53,00	7,67 a	8,00 a	7,83 a	8,00 a	7,83 a	7,67 a	7,83 a	85,0 a
10	40-40	-	30,67	7,50 a	8,00 a	7,67 a	7,83 a	7,67 b	7,67 a	7,50 b	83,7 c
11	35-35	-	48,33	7,50 a	8,00 a	7,67 a	8,00 a	8,00 a	7,67 a	7,50 b	84,3 b
CV (%)				2,00	2,21	2,97	2,46	1,92	2,55	1,61	0,56

pp=primeira parte; sp= segunda parte; TS= tempo de secagem; T= tratamento; F/A= fragrância/aroma; SA= sabor; AC= acidez; CO= corpo; FL= finalização; EQ= equilíbrio; FI= final (impressão global); TOT= nota total. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott-knott ( $p>0,05$ ).

Pela tabela 10, observa-se que os tratamentos não se diferiram significativamente pelo teste Scott-knott ( $p>0,05$ ), para os atributos fragrância/aroma, acidez, corpo e equilíbrio. Quanto ao atributo sabor, os tratamentos 2 e 8 se diferiram negativamente dos demais, sendo ambos secados a partir de 0,428 b.s. com  $T_{po}$  de 10,8 °C. Segundo os especialistas, o sabor é o principal atributo utilizado para definir a qualidade do café e sua nota relata a intensidade, a complexidade e a qualidade da combinação do gosto e do aroma (MASI et al., 2013; SCA, 2015). Menores valores para o atributo finalização foram observados para os tratamentos 1, 2, 4 e 10, que também obtiveram maiores valores de taxa média de redução de água. Para o atributo final, maiores valores foram obtidos pelas maiores  $T_{po}$  e conseqüentemente maiores umidades relativas do ar de secagem, para as combinações de  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C e 35 °C-35 °C, enquanto que para combinação 40 °C-35 °C de  $T_{bs}$ , o maior valor foi obtido pela  $T_{po}$  intermediária.

A avaliação dos atributos sensoriais torna-se importante, pois possibilita identificar características sensoriais distintas e descrever as nuances específicas das fragrâncias e sabores em uma dada amostra (FIGUEIREDO, 2010). Em termos gerais, no presente estudo, as bebidas dos cafés predominantemente tinham sabores desejáveis, como caramelo, chocolate, frutado e mel, não sendo observado um padrão. Também não ocorreu um padrão na descrição do atributo corpo e doçura, com todos os tratamentos com características de corpo denso e cremoso, com boa doçura. Os tratamentos 3, 5 e 9 foram descritos com acidez adocicada e finalização longa, doce e prazerosa, desejável (LINGLE, 2011), se diferenciando dos demais. Por outro lado, o tratamento 2 foi descrito com finalização desbalanceada.

Segundo Borém (2013), um café especial, sinônimo de café fino ou de qualidade superior, apresenta certas características que o diferenciam de outros cafés, como um sabor persistente floral, cítrico e achocolatado, que ajuda a

agregar valor ao produto. As características de sabor caramelo e rapadura também são observadas em cafés de maior qualidade, indicando maior caramelização dos açúcares do grão no momento da torra.

Em relação a nota total do café, as maiores pontuações na análise sensorial foram observadas para os tratamentos 3, 5 e 9 (Tabela 10), segundo teste Scott-knott ( $p < 0,05$ ). Pontuações intermediárias foram obtidas pelos tratamentos 6, 7 e 11, enquanto as menores foram obtidas pelos tratamentos 1, 2, 4, 8 e 10, fato que pode ser explicado por esses tratamentos também terem obtido maiores valores de taxa média de redução de água, pois, altas taxas podem causar a desestruturação e, conseqüentemente, à perda da permeabilidade seletiva do sistema de membranas celulares do endosperma, que tem sido utilizada como indicador de qualidade do café (MARQUES et al., 2008; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009).

O decréscimo da taxa de redução de água por meio do aumento da  $T_{po}$ , promoveu o aumento da qualidade sensorial do tratamento 3, quando comparado aos tratamentos 1, 2 e 10, que também foram submetidos a  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C. Apesar de todos os cafés se enquadrarem como sendo especiais, cafés com pontuação maior ou igual a 85, são descritos como “excelente” e classificados como “especial de origem” segundo a SCA (2015), possuindo maior valor de mercado. Para  $T_{bs}$  de 40 °C-35 °C, tanto o aumento, quanto a redução da  $T_{po}$  provocou uma queda de qualidade do produto. Enquanto que para  $T_{bs}$  de 35 °C-35 °C, tanto o aumento, quanto a redução da  $T_{po}$  provocou um acréscimo de qualidade, porém o aumento da  $T_{po}$  (tratamento 9) resultou em um café “excelente”.

Podemos observar também que, temperaturas de secagem mais elevadas após a meia-seca, foi prejudicial aos atributos sensoriais desses cafés, tendo como única exceção o tratamento 3, provavelmente devido a menor taxa de redução de água ocorrida. Borém et al. (2008) estudando o efeito da temperatura da massa de grãos sobre a qualidade sensorial após um ano de armazenamento, relataram que

o aumento da temperatura de secagem foi prejudicial à manutenção da qualidade sensorial dos cafés em pergaminho. Esse fato corrobora com Saath et al. (2012), que afirmam que maiores temperaturas durante a etapa final do processo de secagem resultam em maiores danos na formação dos precursores sensoriais da qualidade do café.

Ainda na Tabela 10, verifica-se que dentro das combinações de  $T_{bs}$  40 °C-40 °C e 40 °C-35 °C, as maiores  $T_{po}$  promoveram maiores notas totais, porém esse padrão não foi observado para a combinação de  $T_{bs}$  35 °C-35 °C que, para  $T_{po}$  menor (2,6°C) foi observado uma nota total superior à obtida pela  $T_{po}$  intermediária (10,8 °C). Uma explicação é de que as menores temperaturas iniciais e finais no processo de secagem, quando comparado com as outras duas combinações de  $T_{bs}$ , diminuiram o efeito negativo da maior taxa de redução de água promovida pela  $T_{po}$  de 2,6 °C, sob a nota total.

Quando comparado os tratamentos com controle de  $T_{po}$  com os dois tratamentos sem controle de  $T_{po}$ , verifica-se que o tratamento 11, mesmo com  $T_{bs}$  menor, diminuindo a probabilidade de danos térmicos ao produto, resultou em uma menor nota total quando comparado aos tratamentos 3 e 5 submetidos a uma combinação de  $T_{bs}$  maior e com menor tempo total de secagem. O tratamento 9, apesar de possuir mesma combinação de  $T_{bs}$ , resultou um produto de maior qualidade sensorial, mesmo o processo sendo mais demorado. Os tratamentos 6 e 7, quanto as notas sensoriais foram equivalentes ao tratamento 11. A nota total do tratamento 10 foi uma das menores do experimento, e equivalente as notas dos tratamentos 1 e 2, mesmo o tempo de secagem total sendo aproximadamente 10 horas maior que o tempo gasto pelo tratamento 1. Os maiores tempos de secagem, assim como as maiores taxas podem ter contribuído para ocorrência de menores valores de notas totais, devido a maior probabilidade de danos térmicos e desestruturação da membrana celular dos grãos que promove o extravasamento

do líquido intercelular, diminuindo a qualidade final da bebida (ALVES, 2013; SAATH et al., 2012; TAVEIRA et al., 2012).

O estudo do efeito da interação entre  $T_{bs}$  e  $T_{po}$  (UR) sobre as notas totais foi realizado e a análise de variância indicou que a interação teve efeito significativo na nota total da bebida.

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios de nota total obtidos em cada nível de  $T_{bs}$  e  $T_{po}$ . Observa-se que, dentre os níveis de  $T_{po}$ , os maiores valores de nota total foram obtidos pela  $T_{po}$  de 16,2 °C, que resulta em uma umidade relativa do ar semelhante a umidade relativa da região de Matas de Minas durante o período de colheita do café. Ainda referente a  $T_{po}$  de 16,2 °C, nota-se que as combinações de  $T_{bs}$  40 °C-40 °C e 35 °C-35 °C resultaram em maiores notas, apesar do tempo de secagem gasto pela primeira ser 34% menor que o tempo gasto pela segunda combinação.

Tabela 11 Notas totais dos grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.

		$T_{po}$ (°C)		
		2,6	10,8	16,2
$T_{bs}$ (°C-°C)	40-40	83,7 bB (21,1)	83,0 bB (29,5)	85,5 aA (35,1)
	40-35	83,3 cB (37,5)	85,5 aA (44,0)	84,5 bB (48,0)
	35-35	84,5 aA (44,0)	83,3 bB (48,3)	85,0 aA (53,0)
CV		0,48%		

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem significativamente pelo teste de Scott-knott ( $p>0,05$ ) dentro de cada nível de  $T_{bs}$ . Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott-knott ( $p>0,05$ ) dentro de cada nível de  $T_{po}$ . Conteúdo entre parênteses indica o tempo de secagem em horas de cada tratamento.

Para  $T_{po}$  de 2,6 °C, que resulta em uma umidade relativa semelhante à da região do Cerrado de Minas, a combinação de  $T_{bs}$  35 °C-35 °C foi a que obteve maior nota total, porém foi o tratamento de secagem mais demorado, enquanto que, para  $T_{po}$  intermediária, referente a umidade da região do Sul de Minas, a

combinação de  $T_{bs}$  40 °C-35 °C foi a que se mostrou mais indicada para formação de maiores notas.

Quanto aos níveis de  $T_{bs}$ , observa-se que as maiores notas totais foram obtidas pela combinação de  $T_{bs}$  35°C-35 °C, sendo as  $T_{po}$  de 2,6 e 16,2 °C as que mais se destacaram no quesito.

Isquierdo (2011), trabalhando com café natural, observou que a elevação da taxa de redução de água, por meio da redução da  $T_{po}$ , e conseqüentemente da umidade relativa do ar de secagem, tem efeito negativo na qualidade da bebida para as temperaturas de 40 e 35 °C, porém, o mesmo padrão não foi observado neste trabalho, pois, para combinação de  $T_{bs}$  35 °C-35 °C, a qualidade do café submetido a maior taxa de redução de água não se diferenciou do café submetido a menor taxa.

Para melhor discriminar as amostras de café, foi realizado a análise multivariada dos atributos sensoriais junto aos fatores condicionados de secagem. A análise multivariada de componentes principais (ACP) é realizada visando reduzir o número de variáveis e discriminar grupos.

Na Figura 9 são apresentados os biplots obtidos de acordo com a dispersão dos escores, sendo o primeiro componente o de maior variância explicada (38,52%), seguido pelo segundo (15,92%) e assim por diante. Os componentes 3 e 4 explicaram 10,41% e 9,69%, respectivamente (Tabela 12). Os quatro primeiros componentes principais explicaram 74,54% da variância total nas análises realizadas, sendo possível observar quais variáveis mais contribuíram para os agrupamentos formados.

Na Figura 9 apresentada, o ângulo formado pelos vetores corresponde à correlação entre as variáveis estudadas. Quanto menor o ângulo entre os vetores, maior a correlação entre as variáveis. Já a representação da interação entre as combinações de temperatura de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho é

dada por símbolos. Quanto mais próximo um símbolo do outro, maior a similaridade entre os valores das variáveis estudadas.

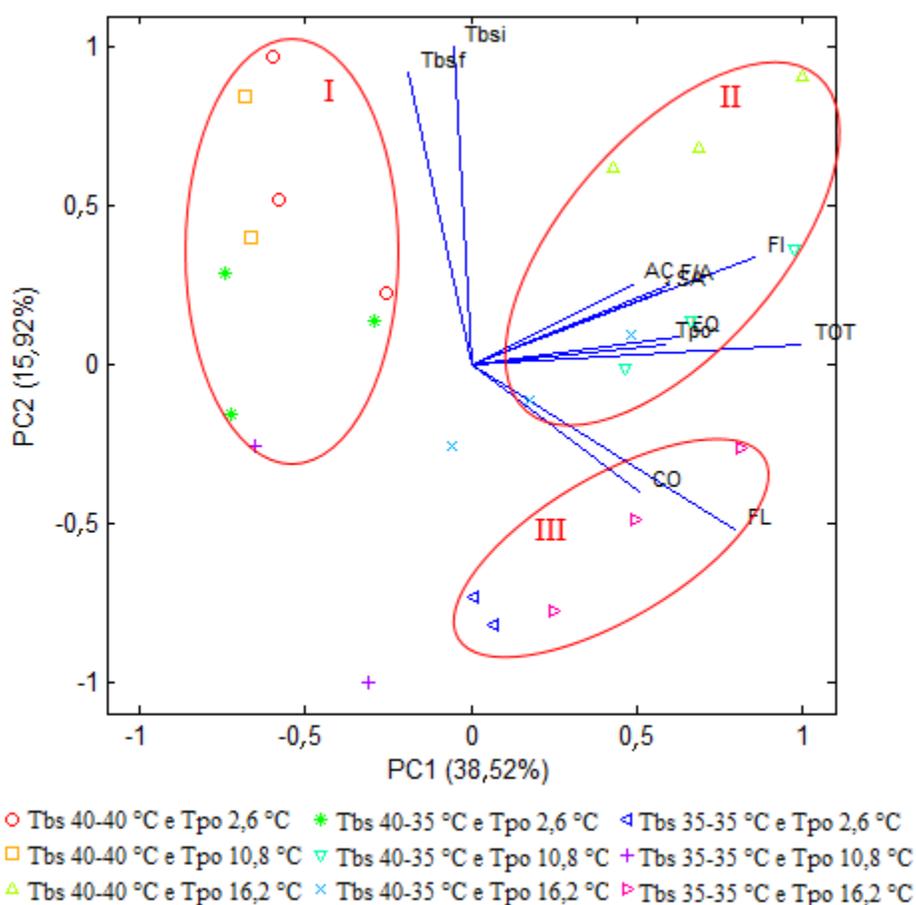


Figura 9 Biplots para os dois primeiros componentes principais, dos quatro utilizados na discriminação dos tipos de secagem em relação as variáveis sensoriais e de secagem. F/A= fragrância/aroma; SA= sabor; AC= acidez; CO= corpo; FL= finalização; EQ= equilíbrio; FI= final; TOT= nota total; T<sub>po</sub>= temperatura de ponto de orvalho; T<sub>bsi</sub>= temperatura de bulbo seco da primeira parte; T<sub>bsf</sub>= temperatura de bulbo seco da segunda parte.

Observa-se, na Figura 9, que o primeiro componente principal relaciona-se positivamente com todos atributos sensoriais e com a T<sub>po</sub>. O pequeno ângulo

formado entre os vetores que representam equilíbrio,  $T_{po}$  e total sugere alta correlação entre as variáveis, logo, suas notas tem comportamento similar em função das variáveis estudadas, o que pode estar relacionado ao fato das maiores  $T_{po}$  promoverem menores taxas de secagem, contribuindo para a maior uniformidade das membranas celulares e conseqüentemente maior conservação da sua qualidade sensorial. O mesmo comportamento é observado entre os vetores acidez, fragrância/aroma, sabor e final, entre os vetores corpo e finalização e entre os vetores  $T_{bsi}$  e  $T_{bsf}$ . O ângulo formado entre sabor e nota total mostra que essas variáveis também estão correlacionadas, e pode ser explicada pelo sabor ser o principal critério utilizado para avaliação da qualidade, pois ele relata a complexidade desse atributo na bebida (MASI et al., 2013), sendo a complexidade uma importante característica de cafés reconhecidos por possuírem qualidade superior.

Os dois primeiros componentes principais sugerem semelhança entre os pontos, formando três grupos distintos da interação entre  $T_{bs}$  e  $T_{po}$  do ar de secagem: o primeiro (I), com os pontos alocados no quadrante superior esquerdo do biplot (Tratamentos 1; 2 e 4), o segundo (II), com pontos alocados em sua maioria no quadrante superior direito do biplot (tratamentos 3; 5 e 6) e o terceiro (III), com pontos alocados em sua maioria no quadrante inferior direito do biplot (tratamentos 7 e 9) (Figura 9). O primeiro grupo (I) se refere aos tratamentos que obtiveram menores notas sensoriais e são os que mais são discriminados pelas combinações de  $T_{bs}$ . O segundo grupo foi mais discriminado pelos atributos equilíbrio, total acidez, fragrância/aroma, sabor e final e pela  $T_{po}$ , são caracterizados por terem obtidos as maiores notas sensoriais. Por fim, o terceiro grupo (III), apesar de possuírem boas notas sensoriais, são caracterizados por serem expostos as menores combinações de  $T_{bs}$  (35 °C-35 °C) e são mais discriminados pelas variáveis corpo e finalização.

Na tabela 12 são apresentados os pesos dos atributos sensoriais e das variáveis de secagem nas quatro primeiras componentes principais de amostras submetidas a diferentes combinações de  $T_{bs}$  e  $T_{po}$ .

Tabela 12 Estimativas dos coeficientes utilizados no cálculo dos escores dos quatro primeiros componentes referente às variáveis secagem e sensorial.

	PC 1 (38,52%)	PC 2 (15,92%)	PC 3 (10,41%)	PC 4 (9,69%)
$T_{bsi}$ (°C)	-0,025498	0,62129	0,19751	0,11475
$T_{bsf}$ (°C)	-0,091004	0,57252	0,28296	0,051219
$T_{po}$ (°C)	0,2805	0,040175	0,38893	-0,34738
Fragrância/aroma	0,28627	0,15518	-0,061703	-0,13333
Sabor	0,27957	0,14266	-0,55043	0,31107
Acidez	0,2341	0,15692	-0,33566	-0,61305
Corpo	0,24328	-0,25109	0,53591	0,035198
Finalização	0,38345	-0,32282	0,108	0,067712
Equilíbrio	0,30271	0,053628	0,058949	0,59966
Final	0,41172	0,20981	0,045461	-0,080684
Total	0,47969	0,037295	-0,076157	0,035253

PC= componente principal.

Os resultados observados na Tabela 12 indicam que as variáveis cujas contribuições tiveram maior importância para a formação da componente 1 (PC1) foram os atributos final e nota total. Já em relação ao componente 2 (PC2), as variáveis de secagem,  $T_{bs}$  inicial e final foram as variáveis que mais influenciaram para a sua formação. Segundo a correlação entre os parâmetros, a  $T_{po}$  foi explicada pelas componentes 3 e 4 (PC 3 e PC 4).

Ainda na Figura 9, podemos observar que a discriminação dos grupos I e II do grupo III, se dá, principalmente pela componente 2 (PC 2), cuja formação é função principalmente das combinações de  $T_{bs}$  e do atributo finalização.

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

Os resultados das alterações nas estruturas das membranas celulares do endosperma do café descascado provocadas pelos efeitos de secagem são observados nas Figuras 10, 11, 12, 13 e 14, por meio das análises de MEV. A escolha dos tratamentos submetidos a MEV foi feita de acordo com os resultados da análise sensorial e dos parâmetros de secagem (tempo e taxa de redução de água).

Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentados os resultados das análises de microscopia eletrônica de varredura para os cafés secados com  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C, submetidos as três  $T_{po}$  utilizadas (2,6; 10,8 e 16,2 °C).

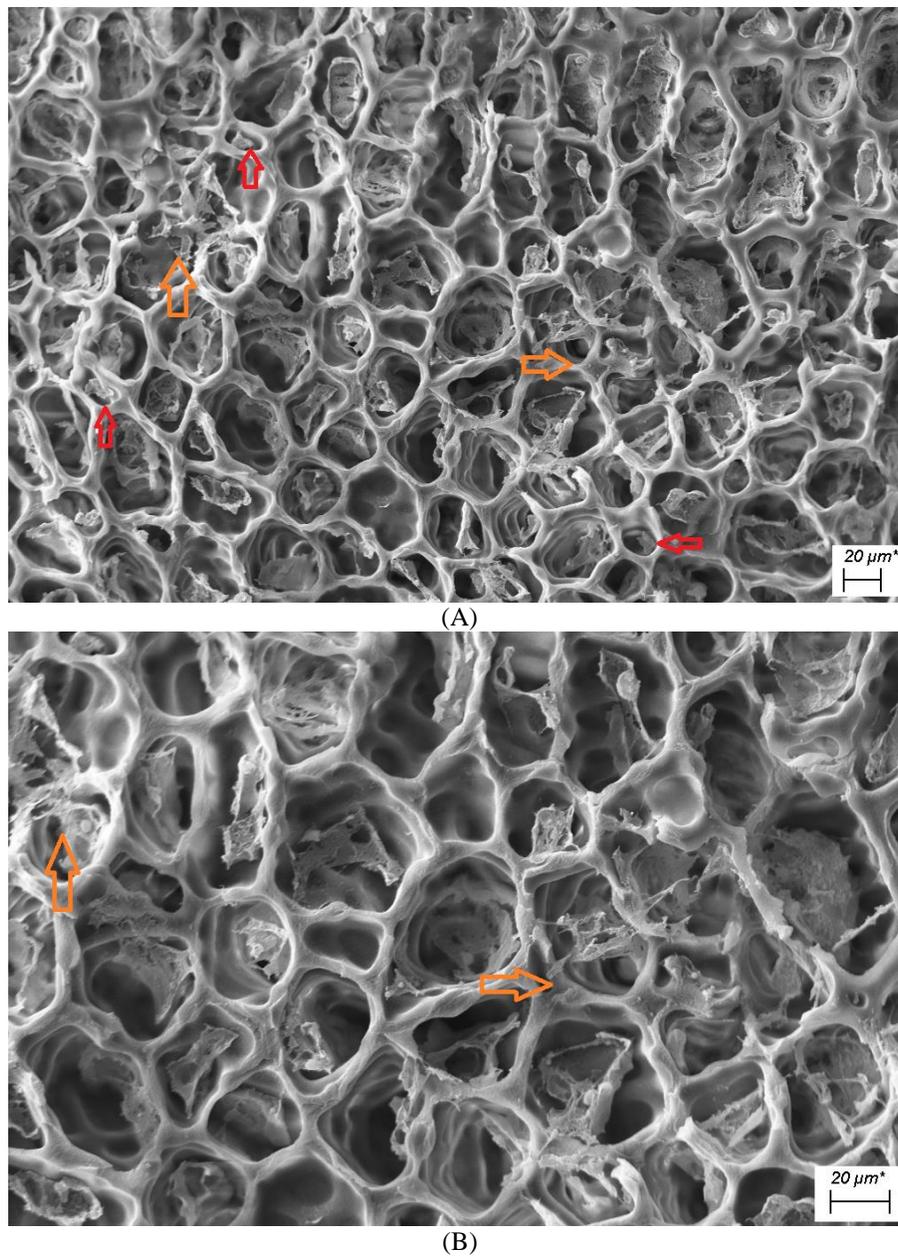


Figura 10 Eletromicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C e  $T_{po}$  de 2,6 °C. (B) é resultado da ampliação de (A). Setas vermelhas indicam espaços intercelulares cheios ou parcialmente cheios e setas cor laranja indicam desestruturação da parede celular.

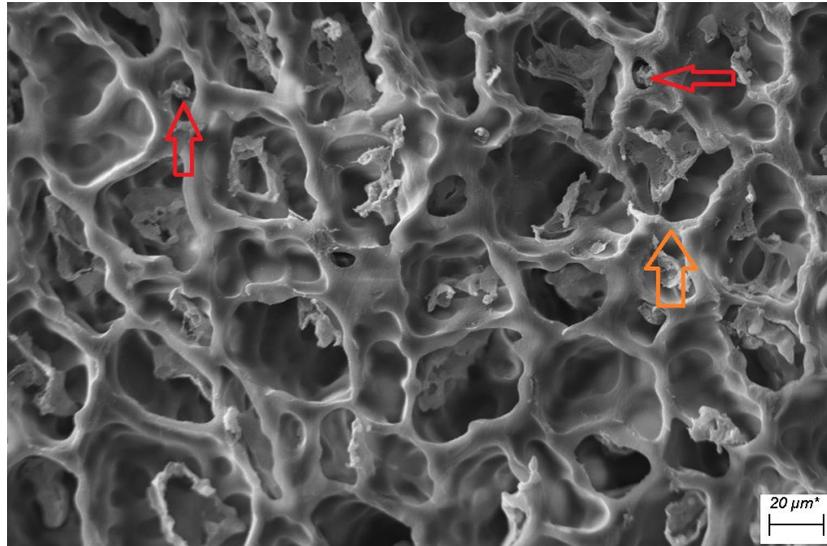


Figura 11 Eletromicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C e  $T_{po}$  de 10,8 °C. Setas vermelhas indicam espaços intercelulares cheios e setas cor laranja indicam desestruturação da parede celular.

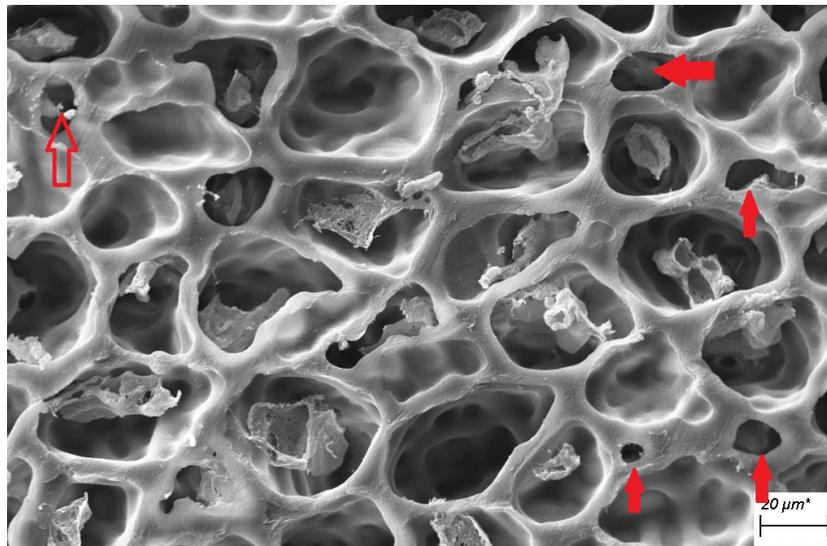


Figura 12 Eletromicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C e  $T_{po}$  de 16,2 °C. Setas sem preenchimento indicam espaços intercelulares parcialmente cheios e setas preenchidas indicam espaços intercelulares vazios.

Nas Figuras 10 e 11, referente aos tratamentos expostos as  $T_{po}$  de 2,6 e 10,8 °C, 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). Na Figura 12, referente a  $T_{po}$  de 16,2 °C, verifica-se um melhor arranjo das paredes celulares e conseqüentemente menores danos estruturais. Os espaços intercelulares não se encontram preenchidos.

Desta forma, os maiores danos estruturais ocorridos nos tratamentos submetidos as duas menores  $T_{po}$ , podem ser explicados pela maior taxa de redução de água na qual foram submetidos. Segundo 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  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C, o que obteve maior nota sensorial foi aquele submetido a  $T_{po}$  de 16,2 °C.

Na Figura 13, referente ao tratamento submetido a  $T_{bs}$  de 40 °C-35 °C e  $T_{po}$  de 10,8 °C, nota-se que as paredes celulares se encontram intactas, indicando maior preservação do líquido intercelular, diminuindo assim a probabilidade de reações químicas indesejáveis e prejudiciais a qualidade da bebida. A maior integridade das paredes celulares quando comparado principalmente aos tratamentos submetidos a  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C com  $T_{po}$  de 2,6 e 10,8 °C, pode ser explicada pela menor  $T_{bs}$  durante a segunda parte da secagem, pois segundo Borém et al. (2013), afirmam que nessa fase, a taxa de transporte interno de água é menor do que a de evaporação, dessa forma, a transferência de calor do ar para os grãos não é compensada pela transferência do vapor de água para o ar de secagem e a temperatura aumenta. Nesse caso, a temperatura provoca o aumento das tensões no interior da célula, as quais podem comprometer a integridade, visto que observaram alterações na estrutura celular, e essas rupturas expõem a célula

a processos oxidativos. Oliveira (2015), também observou maior integridade de cafés via úmida secados a temperatura de 40 °C-35 °C.

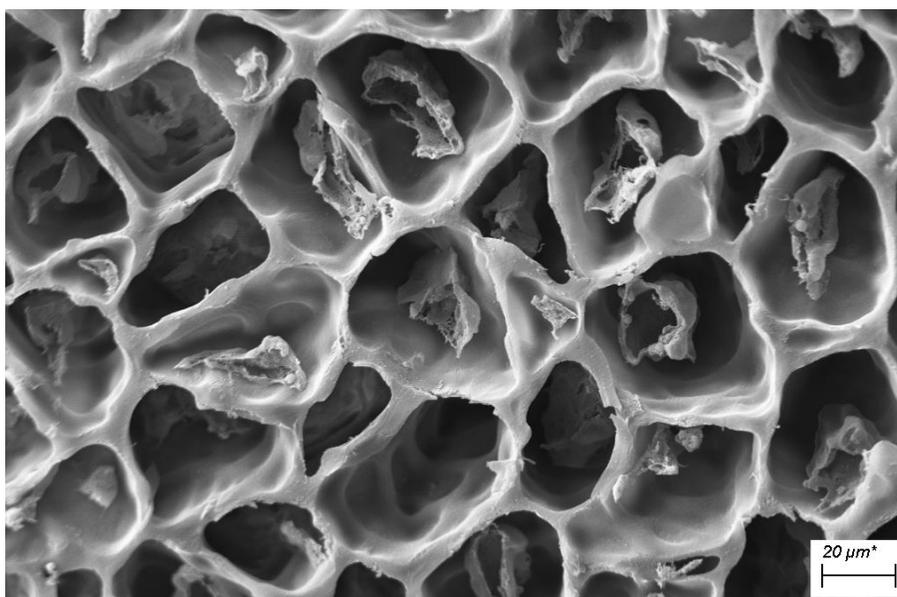


Figura 13 Eletromicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a  $T_{bs}$  de 40 °C-35 °C e  $T_{po}$  de 10,8 °C.

A MEV do tratamento submetido a  $T_{bs}$  de 35 °C-35 °C e  $T_{po}$  de 16,2 °C é apresentada na Figura 14. Nota-se que apesar desse tratamento resultar em uma das maiores notas sensoriais obtidas no experimento e ter obtido o maior tempo de secagem (53 horas de secagem), seu arranjo estrutural apresenta-se mais danificado que o do tratamento com  $T_{bs}$  de 40 °C-35 °C e  $T_{po}$  de 10,8 °C. Uma explicação para o ocorrido é que o maior tempo de secagem pode ter exposto a massa de grãos a condições favoráveis aos processos deteriorativos. Neste sentido, Saath et al. (2010), observaram que mesmo os cafés sendo submetidos a secagem em terreiro, portanto menor taxa de redução de água, obtiveram perdas de qualidade estrutural devido a exposição do produto as condições externas.

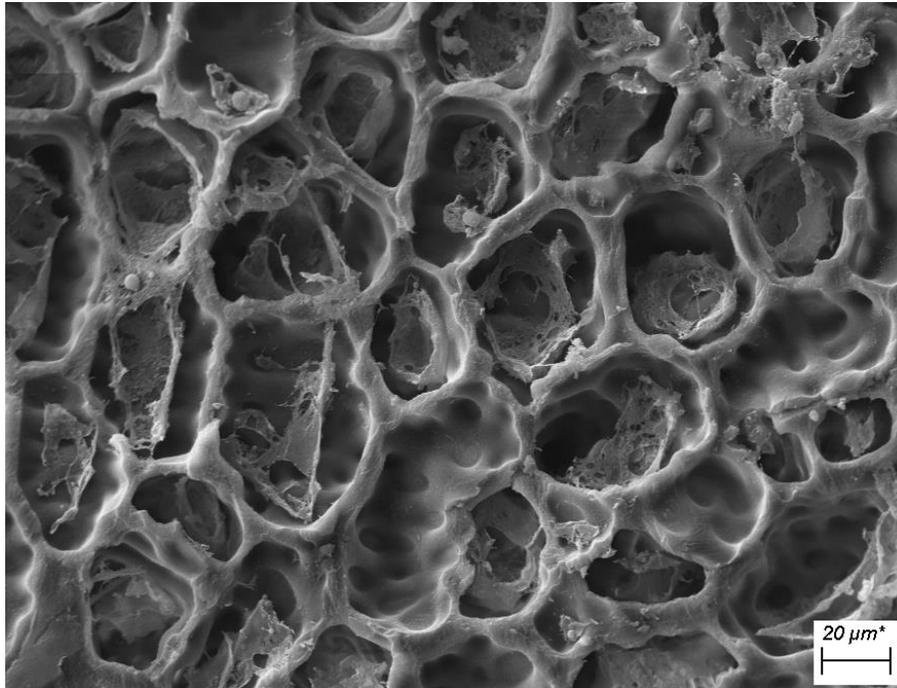


Figura 14 Eletromicrografia de varredura do endosperma do café descascado submetido a  $T_{bs}$  de 35 °C-35 °C e  $T_{po}$  de 16,2 °C.

#### 4.5 Análise de cor

Os valores médios referentes as variáveis de cor analisadas encontram-se descritos na Tabela 13. Nota-se que, valores mais elevados da coordenada  $L^*$  (luminância), relacionada ao branqueamento do café, foram obtidos por tratamentos que resultaram em uma maior taxa média de redução de água, ou seja, tratamentos com combinação de  $T_{bs}$  de 40 °C-40 °C, com  $T_{po}$  de 2,6 °C e sem controle de  $T_{po}$ . Estes tratamentos também foram os que obtiveram menores notas sensoriais. Marques (2006) afirma que maiores temperaturas de secagem rompem as estruturas das membranas celulares, provocando o extravasamento dos óleos e comprometendo a qualidade do café com os processos de oxidação, ocasionando maior branqueamento dos grãos. Os valores da coordenada  $L^*$  encontrados nesse

trabalho variaram de 48,65 a 51,01, similar a valores encontrados na literatura para cafés (CORADI et al., 2008; ABREU et al., 2015).

As coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$  e  $C^*$ , de forma geral apresentam mesmo padrão, sendo os maiores valores observados para os tratamentos com combinação de  $T_{bs}$  40 °C-40 °C e com controle de  $T_{po}$ , enquanto os menores foram obtidos pelos tratamentos com menor combinação de  $T_{bs}$ . Esse padrão pode ser reforçado por meio da Tabela 14, que apresenta a análise de correlação entre as variáveis de cor analisadas, evidenciando a alta correlação entre as variáveis  $b^*$  e  $C^*$ , e moderada correlação entre as variáveis  $a^*$  e  $b^*$  e entre  $a^*$  e  $C^*$ , todas com alto nível de significância ( $p < 0,05$ ). Os valores das coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  são semelhantes aos encontrados para o endosperma do café por outros autores (CORADI et al., 2008; ABREU et al., 2015).

Tabela 13 Valores médios das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  (saturação) e Hue (tonalidade), de grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.

T	$T_{bs-pp-sp}$	$T_{po-sp}$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$ (sat)	Hue (ton)
1	40-40	2,6	50,51 a	0,99 c	17,27 b	17,30 b	86,73 a
2	40-40	10,8	49,91 b	1,11 c	17,47 b	17,50 b	86,37 a
3	40-40	16,2	49,82 b	1,55 a	17,90 a	17,97 a	85,05 c
4	40-35	2,6	49,34 c	1,11 c	16,99 c	17,03 c	86,26 a
5	40-35	10,8	49,20 c	1,17 c	16,83 c	16,87 c	86,04 a
6	40-35	16,2	49,40 c	1,31 b	16,99 c	17,04 c	85,58 b
7	35-35	2,6	49,27 c	1,28 b	16,53 d	16,58 d	85,57 b
8	35-35	10,8	49,19 c	1,08 c	16,69 d	16,72 d	86,31 a
9	35-35	16,2	48,65 c	1,02 c	16,30 d	16,33 d	86,41 a
10	40-40	-	51,01 a	1,08 c	17,03 c	17,06 c	86,38 a
11	35-35	-	49,42 c	1,18 c	16,91 c	16,95 c	86,02 a
CV (%)			0,77	7,58	1,58	1,59	0,31

$pp$ =primeira parte;  $sp$ = segunda parte. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott-knott ( $p > 0,05$ ).

Tabela 14 Análise de correlação entre as variáveis de cor de grãos de café submetidos à diferentes combinações de temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho.

	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$ (sat)	Hue (ton)
$L^*$	100,000	0,02666 0,8636 <sup>+</sup>	0,60174 <0,0001 <sup>+</sup>	0,59471 <0,0001 <sup>+</sup>	0,09822 0,5259 <sup>+</sup>
$a^*$	0,02666 0,8636 <sup>+</sup>	100,000	0,50419 0,0005 <sup>+</sup>	0,52315 0,0003 <sup>+</sup>	-0,98137 <0,0001 <sup>+</sup>
$b^*$	0,60174 <0,0001 <sup>+</sup>	0,50419 0,0005 <sup>+</sup>	100,000	0,99974 <0,0001 <sup>+</sup>	-0,33176 0,0278 <sup>+</sup>
$C^*$	0,59471 <0,0001 <sup>+</sup>	0,52315 0,0003 <sup>+</sup>	0,99974 <0,0001 <sup>+</sup>	100,000	-0,35247 0,0189 <sup>+</sup>
Hue	0,09822 0,5259 <sup>+</sup>	-0,98137 <0,0001 <sup>+</sup>	-0,33176 0,0278 <sup>+</sup>	-0,35247 0,0189 <sup>+</sup>	100,000

<sup>+</sup>p-valor.

É importante ressaltar que, ao analisar o valor das coordenadas  $a^*$  e  $b^*$ , deve-se considerar que menores valores tendem à cor verde e azul nos grãos de café (coloração desejável ao produto), enquanto maiores valores tendem à coloração vermelha e amarela (indesejável). Os resultados encontrados nesse trabalho indicam uma aproximação da coloração verde azulada, desejável, nos cafés submetidos a menor combinação de  $T_{bs}$  (35 °C-35 °C). Este resultado foi também observado por Corrêa et al. (2002), que verificaram que quanto maior a temperatura de secagem menor é a intensidade da cor verde para os cafés processados por via seca e via úmida. Abreu et al. (2015), também relacionaram a cor verde azulada a cafés de maior qualidade.

Por meio da Tabela 14, pode-se destacar também a moderada e significativa correlação entre as variáveis  $L^*$  e  $b^*$  e entre  $L^*$  e  $C^*$ , assim como a alta correlação negativa entre  $a^*$  e Hue, ou seja, apresentam comportamento inverso, maiores valores de uma variável resultam em menores valores da outra, apesar de, quando analisado o teste de médias, não ser observado nenhum padrão entre os valores.

De forma geral, os cafés que apresentaram menores valores das variáveis de cor, ou seja, menor nível de branqueamento, maior proximidade da coloração verde azulada, apresentaram melhores resultados nas avaliações de qualidade sensorial. Alterações na cor são fortes indícios da ocorrência de processos oxidativos e transformações bioquímicas enzimáticas que alteram a composição dos precursores responsáveis pelo sabor e aroma da bebida, resultando em redução da qualidade (ABREU et al., 2015; BORÉM et al., 2013; ISQUIERDO et al., 2011; RENDÓN et al., 2014; RIBEIRO et al., 2011).

## 5 CONCLUSÕES

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

1. Dentre os modelos testados, os modelos de Aproximação da Difusão e Midilli Modificado foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais referentes a primeira e segunda parte de secagem respectivamente, de grãos de café (*Coffea arabica* L.).
2. O coeficiente de difusividade efetivo de grãos de café varia de  $0,81 \times 10^{-11}$  a  $1,84 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  durante a primeira parte da secagem e varia de  $1,49 \times 10^{-11}$  a  $3,29 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  durante a segunda parte da secagem, aumentando significativamente com a redução da temperatura de ponto de orvalho e aumento da temperatura de bulbo seco.
3. Para uma mesma temperatura de bulbo seco, a redução da temperatura de ponto de orvalho e conseqüentemente a umidade relativa, aumenta a taxa de redução de água e reduz o tempo de secagem dos grãos de café.
4. Cafés submetidos a secagem com temperatura de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  e temperatura de ponto de orvalho de  $16,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (UR de 25%) são indicados para produção de cafés de maior qualidade em menores tempos.
5. Devido as características climáticas de cada região e visando maior qualidade, indica-se temperaturas de secagem de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  para o Cerrado Mineiro e  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ - $35 \text{ }^\circ\text{C}$  para Sul de Minas. Para região de Matas de Minas, a combinação de temperatura de secagem de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ - $35 \text{ }^\circ\text{C}$  não é indicada para se obter cafés de melhor qualidade.
6. Temperatura de ponto de orvalho de  $16,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (UR de 25%) durante a secagem de cafés descascados, resultam em cafés com maior integridade celular quando expostos a temperaturas de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .
7. Devido as características climáticas, para região Sul de Minas, a temperatura de secagem combinada de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ - $35 \text{ }^\circ\text{C}$  mantém a estrutura celular preservada.

## 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. et al. Alterações na coloração de grãos de café em função das operações pós-colheita. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 429-436, out./dez. 2015.

AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e da qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 373 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 349-353, set./dez. 1999.

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Influência do tempo de armazenagem na cor dos grãos de café pré-processados por "via seca" e "via úmida". **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 6, p. 1268-1276, dez. 2003.

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.

ALMEIDA, D. P. et al. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 2, n. 1, p. 72-83, 2009.

ALPIZAR, E. et al. Incidence of elevation on chemical composition and beverage quality of coffee in Central America. In: **ASIC 2004. 20th International Conference on Coffee Science, Bangalore, India, 11-15 October 2004**. Association Scientifique Internationale du Café (ASIC), 2005. p. 322-327.

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, M. Metodologia tradicional de avaliação de qualidade de café vs. métodos eletrônicos alternativos. In: SALVA, T. de J. G. et al. (Ed.). **Cafés de**

**qualidade:** aspectos tecnológicos, científicos e comerciais. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2007. p. 389-410.

AMARAL, R. et al. Simulation of coffee drying using computational fluid dynamics. **Coffee Science**, v. 13, p. 477-488, 2018.

AMORIM, H.V. **Aspectos bioquímicos e histoquímicos do grão de café verde relacionados com a deterioração de qualidade**. Piracicaba: ESALQ, 1978. 85p. (Dissertação de Livre Docência).

ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engvista**, Niterói, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.

ARAUJO, R. F. et al. Conservação de sementes de café (*Coffea arabica* L.) despulpado e não despulpado. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 30, n. 3, p. 71-78, maio 2008.

ARRUDA, N. P. et al. Discriminação entre estádios de maturação e tipos de processamento de pós-colheita de cafés arábica por microextração em fase sólida e análise de componentes principais. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 5, p. 819-824, fev. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ- ABIC. Disponível em:  
<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=48#6090/>>.  
Acesso em:04 mar. 2018.

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.

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.

BARBOSA, W. M.; BREGAGNOLI, M.; SACCONI, E. J. da C. A pesquisa e o desenvolvimento tecnológico na cafeicultura brasileira. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 7, n. 3, p. 89-96, set. 2015.

BHUMIRATANA, N.; ADHIKARI, K.; CHAMBERS IV, E. Evolution of sensory aroma attributes from coffee beans to brewed coffee. **LWT - Food Science and Technology**, London, v. 44, n. 10, p. 2185-2192, July 2011.

BORÉM, F. M. **Efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade de sementes de milho (*ZeamaysL.*), híbrido AG – 303.** 1992. 50 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

BORÉM, F. M. et al. (Ed.). **Armazenamento do café.** Lavras: Ed. UFLA, 2008. 631 p. Edição especial café.

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. Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v. 52, p. 1-6, Jan. 2013.

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. et al. Quality of natural and washed coffee after drying on ground and with high temperature. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1609-1615, set./out., 2008.

BORÉM, F. M. et al. The relationship between organic acids, sucrose and the quality of specialty coffees. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 11, n. 8, p. 709-717, Feb. 2016.

BORÉM, F. M. **Handbook of coffee post-harvest technology.** Norcross, Georgia: Gin Press, 2014. v. 1.

BORÉM, F. M.; ISQUIERDO, E. P.; TAVEIRA, J. H. S. Coffee Processing. In: BORÉM, F. M. (Org.). **Handbook of coffee post-harvest technology.** Norcross, Georgia: Gin Press, 2014. v. 1, p. 49-68.

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

BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R. Qualidade do café despulpado submetido a diferentes processos de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, n. 9, p. 25-31, 2006.

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

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

BRASIL. Instrução Normativa nº 8, de 11 de Junho de 2003. Regulamento Técnico de Identidade e de Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado Grão cru. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 13 jun. 2003. Seção 1, p. 22-29.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Saiba Mais**. 2015. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>>. Acesso em: 09 jul. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cafeicultura brasileira**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, 399 p, 2009. <[http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946\\_regras\\_analise\\_\\_sementes.pdf](http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf) > Acesso em: 12 jan. 2019.

BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION - BSCA. Disponível em: <<http://bsca.com.br/cafes-especiais.php>>. Acesso em: 22 out. 2018.

BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION - BSCA. **O que são cafés especiais?** Disponível em: <<http://bsca.com.br/cafes-especiais.php>>. Acesso em: 10 Jul. 2017.

BRO, R.; SMILDE, A. K. Principal component analysis. **Analytical Methods**, New York, 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 Publishing, 1992. 450 p.

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, Aug. 2010.

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.

CAMELO, A. L.; GÓMEZ, P. A. Comparison of color indexes for tomato ripening. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 3, p. 534-537, 2004.

CARVALHO, V. D. et al. Relação entre a composição físico-química dos grãos de café beneficiado e a qualidade da bebida do café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 3, p. 4449-445, mar. 1994.

CASTOLDI, G.; CASTOLDI, G. Pré-processamento e secagem do café. **Revista Varia Scientia Agrárias**, Cascavel, v. 03, n. 02, p. 175-193, jul. 2013.

CHEONG, M. W. et al. Volatile composition and antioxidant capacity of Arabica coffee. **Food Research International**, Amsterdam, v. 51, p. 388-396, Dec. 2013.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. (Ed.). **Storage of cereal grain and their products**. Saint Paul: AACC, 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- CONAB. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 22 out. 2018.

CONSELHO DE EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL- CECAFE. Disponível em: <<http://www.cecafe.com.br/>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

CORADI, P. C.; BORÉM, F. M. Alterações dos parâmetros físico químicos na qualidade de bebida do café natural e despolpado em função de diferentes tipos de secagem e condição de armazenamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n. 11, p. 54-63, 2009. Edição Especial Café.

CORADI, P. C.; BORÉM, F. M.; OLIVEIRA, J. A. Qualidade do café natural e despolpado após diferentes tipos de secagem e armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 181-188, 2008.

CORRÊA, J. L. G. et al. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 96, n. 4, p. 498-504, Feb. 2010.

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. 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.

CORRÊA, P.C.; AFONSO JUNIOR, P. C.; PINTO, F. A. C. Efeito da temperatura de secagem na cor dos grãos de café pré-processado por “via seca” e “via úmida”. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial, n.5, p.22-27, 2002.

CORTEZ, J. G. **Efeito de espécies e cultivares e do processamento agrícola e industrial nas características da bebida do café**. 2001. 71 p. Tese (Doutorado em Agronomia: Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2001.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1089- 1096, 2011.

DALVI, L. P. et al. Qualidade de café nos estádios cereja e verde-cana via condutividade elétrica. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 6, n. 22, p. 410-414, 2013.

DELLA LUCIA, S. M.; MININ, V. P. R. M.; CARNEIRO, J. D. S. Análise sensorial de alimentos. In: MININ, V. P. R. M. (Ed.). **Análise sensorial: estudos com consumidores**. Viçosa: Editora da UFV, 2006. Cap. 6, p. 125-167.

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

DUARTE, G. S.; PEREIRA, A. A.; FARAH, A. Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. **Food Chemistry**, London, v. 118, n. 3, p. 851-855, 2010.

DULLO, M. E. et al. Cost efficiency of cryopreservation as a long-term conservation method for coffee genetic resources. **Crop Science**, v. 49, n. 6, p. 2123-2138, 2009.

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.

FAGAN, E. B. et al. Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea* sp) na qualidade da bebida. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 5, p. 729-738, set./out. 2011.

FARAH, A. et al. Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. **Food Chemistry**, London, v. 98, n. 2, p. 373-380, 2006.

FARAH, A. et al. Effect of Roasting on the Formation of Chlorogenic Acid Lactones in Coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 53, n. 5, p. 1105-1113, Feb. 2005.

FARAH, A.; DONANGELO, C. M. Phenolic compounds in coffee. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 18, n. 1, p. 23-36, Jan./Mar. 2006.

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.

FAVARIN, J. L. et al. Qualidade da bebida de café de frutos cereja submetidos a diferentes manejos pós-colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 187-192, fev. 2004.

FERIA-MORALES, A. M. Examining the case of green coffee to illustrate the limitations of grading systems/experts tasters in sensory evaluation for quality control. **Food Quality and Preference**, Barking, v. 13, n. 6, p. 355-367, Sept. 2002.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

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.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 670 p.

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.

GHOSH, P.; VENKATACHALAPATHY, N. Processing and drying of coffee - a review. **International Journal of Engineering Research & Technology**, Ghaziabad, v. 3, n. 12, p. 784-794, Dec. 2014.

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.

GIRANDA, R. N. Aspectos qualitativos de cafés (*coffea arabica* L.) submetidos a diferentes processos de secagem. 1998. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.

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

GONELI, A. L. D. et al. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. *Acta Scientiarum Agronomy*, Londrina, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.

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.

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. Grain drying theory: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

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.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the chemistry of quality**. London: Academic Press, 1995. 253 p.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the science of quality**. London: Academic, 2005. 398 p.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. News from the executive director. Disponível em: <<http://www.ico.org/Market-Report-17-18-e.asp>> Acesso em: 22 out. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Green coffee: determination of loss mass at 105 oC: ISO 6673**. New York: ISO, 1999. 4 p.

ISMAIL, I.; ANUAR, M.S.; SHAMSUDIN, R. Effect on the physico-chemical properties of liberica green coffee beans under ambient storage. **International Food Research Journal**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 255–264, 2013.

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 ASAE**, Saint Joseph, v. 53, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

ISQUIERDO, E. P. et al. Qualidade do café cereja desmucilado submetido ao parcelamento da secagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-90, jan./abr. 2011.

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, Aug. 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, 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: 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.

KLEINWÄCHTER, Maik; SELMAR, Dirk. Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees. **Food chemistry**, London, v. 119, n. 2, p. 500-504, Mar. 2010.

KRZYŻANOWSKI, F. C.; WEST, S. H.; FRANÇA NETO, J. B. Drying soybean seed using air ambient temperature at low relative humidity. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 28, n. 2, p. 77-83, mar./abr. 2006.

KWON, D. J. et al. Assessment of green coffee bean metabolites dependent on coffee quality using a H NMR-based metabolomics approach. **Food Research International**, Amsterdam, v. 67, p. 175-182, Jan. 2015.

LEITE, R. A. et al. Qualidade tecnológica do café (*Coffea arabica* L.) préprocessado por “via seca” e “via úmida” avaliada por método químico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 308-311, 1998.

LELOUP, V. et al. Impact of wet and dry process on green coffee composition and sensory characteristics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN COFFEE SCIENCE, 20., 2004, Bangalore. **Proceedings...** Bangalore: ASIC, 2004. 1 CD-ROM.

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

LIDON, FC et al. Ação fungicida de *Aureobasidium pullulans* sobre *Penicillium expansum* em pêra "Rocha": implicações para o estresse oxidativo durante o armazenamento de frutos. **International Journal of Pest Management**, v. 58, p. 41-52, 2012.

LIMA-FILHO, T. et al. Composição físico-química e qualidade sensorial de café conilon produzido no Estado do Espírito Santo e submetido a diferentes formas de processamento. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1723-1730, jul./ago. 2013.

LINGLE, T. R. **The coffee cupper's handbook**: systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor. 4. ed. California: Specialty Coffee Association of America, 2011. 66 p.

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.

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

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

MALTA, M. R.; CHAGAS, S. J. de R.; SILVA, W. M. Composição físico-química e qualidade do café submetido a diferentes formas de pré-processamento. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 6, n. 6, p. 37-41, 2003.

MALTA, M. R.; CHAGAS, S. J. R. M. Processamento e qualidade do café produzido na região do cerrado mineiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 6., 2009, Vitória. **Resumos...** Brasília: Embrapa Café, 2010.

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.

MASI, C. et al. Sensory properties of under-roasted coffee beverages. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 78, n. 8, p. 1290-1300, 2013.

MAZZAFERA, P.; PURCINO, R. Post harvest processing methods and physiological alterations in the coffee fruit. In: COLLOQUE SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL SUR LE CAFÉ, 2005, Bangalore. **Proceedings...** Bangalore: ASIC, 2005.

MENCHÚ, E. F. La determinación de la calidad del café. I. Características, color y aspecto. **Agricultura de las Américas**, Kansas, v. 16, n. 5, p. 18-21, May 1967.

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

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

MONDEGO, J. M. C. et al. An EST-based analysis identifies new genes and reveals distinctive gene expression features of *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. **BMC Plant Biology**, London, v. 11, n. 30, p. 1-23, Feb. 2011.

NOBRE, E. P. et al. Composição química de frutos imaturos de café arábica (*Coffea arabica* L.) processados por via seca e via úmida. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 107-113, maio/ago. 2011.

NOBRE, G. W. **Alterações qualitativas do café cereja descascado durante o armazenamento**. 2005. 135 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

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.

OCTAVIANI, J. C. **Secagem de café cereja descascado desmucilado com utilização de gás liquefeito de petróleo**. 2000. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

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. **Aspectos ultraestruturais e fisiológicos associados à qualidade da bebida de café arábica submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. 2010. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

OLIVEIRA, P. D. **Qualidade e alterações estruturais do café arábica submetido a alternância da temperatura na secagem**. 2015. 144 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil, 2015.

ONDIER, G. O.; SIEBENMORGEN, T. J.; MAUROMOUSTAKOS, A. Lowtemperature, low-relative humidity drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 100, n. 3, p. 545-550, Oct. 2010.

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, 1998. 303 p.

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

PICCINO, S. et al. Aromatic composition and potent odorants of the “specialty coffee” brew “Bourbon Pointu” correlated to its three trade classifications. **Food Research International**, Amsterdam, v. 61, p. 264-271, July 2014.

PIMENTA, C. J. et al. Composição química e avaliação da qualidade do café (*Coffea arabica* L.) colhido em diferentes épocas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, n. 10, p. 29-35, 2008. Especial café.

PROGRAMA INTEGRADO DE APOIO À TECNOLOGIA CAFEEIRA – Fundação procafé. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/grao-sagrado/noticia/inicio-da-colheita-do-cafe-aquece-geracao-de-empregos-no-sul-de-minas.ghtml>>. Acesso em: 23 out. 2018.

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.

REINATO, C. H. R. et al. Qualidade do café secado em terreiros com diferentes pavimentações e espessuras de camada. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 3, p. 223-237, set./dez. 2012.

RENDÓN, M. Y.; SALVA, T. J. G.; BRAGAGNOLO, N. Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage. **Food Chemistry**, London, v. 147, p. 279-286, Mar. 2014.

RESENDE, O. et al. Influência do tipo de pavimento na secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiros de concreto e chão batido. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 171-178, 2007.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática da secagem do café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiros de concreto e híbrido. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 153-160, 2010.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2008.

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 descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RIBEIRO, D. E. et al. Interaction of genotype, environment and processing in the chemical composition expression and sensorial quality of Arabica coffee. **African Journal of Agricultural Research**, Ebene, v. 11, n. 27, p. 2412-2422, July 2016.

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, D. M. **Qualidade do café cereja descascado submetido a diferentes temperaturas, fluxos de ar e períodos de pré-secagem**. 2003. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

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.

RODARTE, M. P. **Análise sensorial, química e perfil de constituintes voláteis de cafés especiais**. 2008. 147 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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.

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.

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.

SALAZAR, J. C. S.; BURGOS, E. R.; BAUTISTA, E. H. D. Efecto de las condiciones de cultivo, las características químicas del suelo y el manejo de grano en los atributos sensoriales de café (*Coffea arabica* L.) en taza. **Acta Agronómica**, Palmira, v. 64, n. 4, p. 342-348, 2015.

SANTOS, M. A.; CHALFOUN, S. M.; PIMENTA, C. J. Influência do processamento por via úmida e tipos de secagem sobre a composição, físico química e química do café (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 213-218, jan./fev. 2009.

SCHMIDT, C. A. P.; MIGLIORANZA, E. Análise sensorial e o café: uma revisão the sensory analysis and the coffee: anrevisión. **Revista Científica Inovação e Tecnologia**, Medianeira, v. 1, n. 2, p. 16-24, jul. 2010.

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.

SELMAR, D.; KLEINWÄCHTER, M.; BYTOF, G. Metabolic responses of coffee beans during processing and their impact on coffee flavor. In: SCHWAN, F. R.; FLEET, H. G. (Ed.). **Cocoa and coffee fermentations**. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 73-81.

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.

SHEWFELT, RL Medição de qualidade e maturação. Em: SHEWFELT, R. L; PRUSSIA, SE (Eds.). **Manipulação Pós-Colheita - Uma Abordagem de Sistemas**. San Diego: Academic Press, 1993. p. 99-124

SILVA, F. N. et al. Institucionalização das indicações geográficas no Brasil e na Espanha. **Ciência Rural**, Santa Maria, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/2013nahead/a24813cr2012-0796.pdf>>. Acesso em: 5 ago. 2016.

SILVA, J. de S.; BERBERT, P. A. **Colheita, secagem e armazenagem de café**. Viçosa: Aprenda Fácil, 1999. 146 p.

SILVA, L. M. M. et al. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian journal of food technology**. Campinas, v. 17, n. 4, p. 310-318, out./dez. 2014.

SILVA, P. A. et al. Quality assessment of coffee grown in Campos Gerais, Minas Gerais State, Brazil. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 36, n. 4, p. 739-744, Oct./Dec. 2014.

SILVA, R. G. Qualidade de grãos de café (*Coffea arabica* L.) armazenados em coco com diferentes níveis de umidade. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 3, p. 10-15, Mar. 2001.

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. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Londrina, v. 34, n. 3, p. 231-238, 2012.

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. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Propriedades físicas dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem e drying kinetics of Jatropha seeds. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 5, n. 1, p. 83-92, Jan./Apr. 2012.

SMITH, A. W. Agricultural practices. In: CLARKE, R. J.; MACRAE, R. (Ed.). **Coffee chemistry**. Amsterdam: Elsevier Applied Science, 1985. p. 18-23.

SOARES, L. Na contramão da crise, café segura a geração de empregos no Sul de MG, **G1 Sul de Minas**, Varginha, 25 Agosto de 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2015/08/na-contramao-da-crise-cafe-segura-geracao-de-empregos-no-sul-de-mg.html>>. Acesso em: 22 out. 2018.

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 Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. **Metodologia b.u. de avaliação de cafés especiais**: guia rápido. Long Beach: Specialty Coffee Association, 2009. 7 p. Disponível em: <<http://www.scaa.org>>. Acesso em: 23 ago. 2011.

SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. **SCA protocols cupping specialty coffee**. 2015. Disponível em: <<http://scaa.org/PDF/resources/cupping-protocols.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

SPEER, K.; KÖLLING-SPEER, I. The lipid fraction of coffee bean. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 18, p. 201-216, 2006.

SPÓSITO, M. B.; BASSANEZI, R. B.; AMORIM, L. Resistência à Mancha Preta dos Citros avaliada por curvas de progresso da doença. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 5, p. 532-537, 2004.

TAVARES, K. M. **Deteção de adulteração em café riado torrado e moído por espectroscopia no infravermelho e análise sensorial**. 2012. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

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.

TAVEIRA, J. H. S. da et al. Potential markers of coffee genotypes grown in different Brazilian regions: a metabolomics approach. **Food Research International**, Barking, v. 61, p. 75-82, July 2014.

TAVEIRA, J. H. S. et al. Perfis proteicos e desempenho fisiológico de sementes de café submetidas a diferentes métodos de processamento e secagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 10, p. 1413-1554, out. 2012.

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.

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.

TOLESSA, K. et al. Prediction of specialty coffee cup quality based on near infrared spectra of Green coffee beans. **Talanta**, Amsterdam, v. 150, p. 367-374, Apr. 2016.

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.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 387-394, 2008.

VILELA, E.R.; CHANDRA, P.K.; OLIVEIRA, G.A. Efeito da temperatura e umidade relativa no branqueamento de grãos de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.especial, n.1, p.31-37, 2000.

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

VOSS, DH Relacionando a medição do colorímetro da cor da planta à Carta de Cores da Royal Horticultural Society. **HortScience** , v. 27, n. 12, p. 1256-1260, 1992.

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

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