



GUILHERME EURIPEDES ALVES

**CINÉTICA DE SECAGEM E QUALIDADE DO
CAFÉ PARA DIFERENTES TEMPERATURAS E
FLUXOS DE AR**

LAVRAS-MG

2013

GUILHERME EURIPEDES ALVES

**CINÉTICA DE SECAGEM E QUALIDADE DO CAFÉ PARA
DIFERENTES TEMPERATURAS E FLUXOS DE AR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Flávio Meira Borém

LAVRAS – MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Alves, Guilherme Euripedes.

Cinética de secagem e qualidade do café para diferentes
temperaturas e fluxos de ar / Guilherme Euripedes Alves. – Lavras :
UFLA, 2013.

131 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Flávio Meira Borém.

Bibliografia.

1. *Coffea arabica* L. 2. Taxa de secagem. 3. Composição
química. 4. Modelagem matemática. 5. Análise multivariada. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 620.00113

GUILHERME EURIPEDES ALVES

**CINÉTICA DE SECAGEM E QUALIDADE DO CAFÉ PARA
DIFERENTES TEMPERATURAS E FLUXOS DE AR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 6 de setembro de 2013.

| | |
|---------------------------------|--------|
| Dr. Ednilton Tavares de Andrade | UFF |
| Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa | UFLA |
| Dr. Marcelo Ribeiro Malta | EPAMIG |

Dr. Flávio Meira Borém
Orientador

LAVRAS - MG

2013

Aos meus pais, Valdoveu e Vera.

A minha filha, Laura.

A minha noiva, Marina.

DEDICO

A Deus,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Valdoveu e Vera, e minha irmã, Priscilla, pelo amor e apoio.

À minha noiva, Marina, pelo amor, incentivo e companheirismo.

A todos os familiares, em especial aos meus avós, Jasminor, Manoela e Eurides; ao tio “Miro” e as minhas tias Valma, Valda, Vera e Telma, pelo amor e apoio.

Ao professor Flávio Borém, pela orientação, amizade, incentivo e confiança.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o mestrado.

Aos membros da banca, pela disponibilidade, contribuição e sugestões.

Aos amigos Eder e Valdiney, pela valiosa contribuição, atenção, amizade e presença constante durante a realização do trabalho.

Ao amigo Afonso, pela valorosa contribuição durante a elaboração do trabalho.

Aos professores Marcelo Ângelo Cirillo e Luisa Perreira Figueiredo, por ajudar nas análises estatísticas.

Ao laboratorista Fabrício, pela realização das análises químicas do café.

Ao produtor Paulo Sérgio Carneiro Ribeiro e aos funcionários da Fazenda São José, por cederem o café utilizado no experimento e ajudar na colheita e preparo das amostras.

Aos integrantes, ex-integrantes e amigos do Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas da UFLA (Lourenço, Flávio, Wilson, Vandimilli, Ivan, Pedro, Juliana, Fabiana, Samuel, Paula, Diego, Isabella, Camila, Caio, Carlos Henrique, Ricardo, Gerson, José Henrique, Luisa, Daiane,

Marcos Paulo, Murilo, Danilo e Janaína), pela ajuda, amizade e troca de experiências durante a realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas da República Villa Velha.

Ao Departamento de Engenharia, pela disponibilidade dos equipamentos e da estrutura para a realização dos trabalhos.

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

Aos funcionários do Polo de Tecnologia em Pós-Colheita do Café, pelo auxílio na montagem do experimento.

RESUMO

Apesar de ser líder no mercado mundial e se apresentar tecnologicamente preparado para oferecer altas produtividades e elevadas velocidades de colheita, o Brasil necessita de uma nova tecnologia ou metodologia de secagem, que permita reduzir o tempo de secagem sem alterar a qualidade da bebida. Diante disso, este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar os efeitos da taxa de secagem na qualidade do café arábica processado pela via seca e via úmida, bem como estudar a cinética de secagem para diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem. Para isso, foram realizados três experimentos. No primeiro experimento, foram avaliados os efeitos de duas temperaturas do ar de secagem (40 e 45 °C) e quatro fluxos de ar de secagem (24; 60; 96 e 132 m³.min⁻¹.m⁻²) na cinética de secagem do café natural e despulpado. O modelo de Valcam foi o que melhor se ajustou para descrever o processo de secagem do café despulpado seco a 40°C, enquanto, para o café natural, o modelo proposto foi o de Midilli; nenhum modelo ajustou-se satisfatoriamente para descrever o processo de secagem do café despulpado secado a 45 °C; a elevação da temperatura e do fluxo de ar proporcionou redução do tempo de secagem e aumento da taxa de secagem, tanto para o café natural como para o despulpado; o tempo gasto para a secagem do café, considerando o mesmo processamento e temperatura do ar de secagem até atingir o teor de água de 0,125±0,005 kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs) no grão, utilizando o fluxo de ar de 96 e 132 m³.min⁻¹.m⁻², foi estatisticamente igual. O segundo experimento foi realizado com o objetivo de avaliar a correlação entre variáveis fisiológicas (condutividade elétrica, lixiviação de potássio e porcentagem de germinação) e variáveis de cinética de secagem (tempo e taxa de secagem), bem como verificar a relação entre as variáveis de cinética de secagem e a qualidade sensorial do café, em função do tipo de processamento (natural e despulpado), temperatura (40 e 45 °C) e fluxo de ar de secagem (24 e 96 m³.min⁻¹.m⁻²). Após a secagem mecânica, foi avaliada a qualidade fisiológica e sensorial. Concluiu-se que o café processado via seca é mais sensível à secagem mecânica com ar aquecido do que o processado via úmida, apresentando pior desempenho fisiológico; o fluxo de ar não interfere na qualidade fisiológica do café despulpado e natural; a elevação da temperatura de 40 para 45 °C resultou em queda da qualidade fisiológica apenas para o café despulpado e a elevação da taxa de secagem, por meio da elevação do fluxo de ar de secagem para a temperatura de 40 °C, apresentou correlação negativa com a qualidade sensorial do café despulpado. O terceiro experimento foi realizado com o objetivo de avaliar as possíveis alterações na qualidade sensorial e nos teores de sacarose, glicose, frutose, rafinose e maltose, tanto para o café natural como para o despulpado, em função do fluxo (24 e 96 m³.min⁻¹.m⁻²) e da

temperatura do ar de secagem (40 e 45 °C), bem como correlacionar o teor destes constituintes químicos com a qualidade sensorial do café. Após a secagem, os teores de sacarose, glicose, frutose, rafinose e maltose foram quantificados utilizando cromatografia líquida de alta precisão. Conclui-se que o conteúdo de açúcares não é influenciado pela temperatura e pelo fluxo de ar de secagem; o teor de sacarose, rafinose, maltose, glicose e frutose não apresenta relação com a qualidade sensorial; cafés naturais apresentam maiores teores de sacarose, glicose, frutose e maltose e cafés secados à temperatura de 40 °C e fluxos de $24 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ tendem apresentar melhor qualidade sensorial.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. Taxa de secagem. Modelagem matemática. Análise multivariada. Composição química.

ABSTRACT

Although it is a leader in the world market and is technologically prepared to offer high yields and high speed harvest, Brazil needs new technology or a new methodology for drying which will allow reduction in drying time without changing beverage quality. In light of that, this study was carried out with the general aim of evaluating the effects of the drying rate on the quality of dry-processed and wet-processed Arabica coffee, as well as studying the drying kinetics for different drying temperatures and air flows. Three experiments were performed for that purpose. In the first experiment, we evaluated the effects of two drying air temperatures (40 and 45°C) and four drying air flow rates (24, 60, 96 and 132 m³.min⁻¹.m⁻²) on the drying kinetics of natural coffee and pulped coffee. The Valcam model was that which best fit to describe the drying process of the pulped coffee dried at 40°C, while, for natural coffee, the model proposed was that of Midilli. No model fit in a satisfactory manner for describing the drying process of the pulped coffee dried at 45°C. The rise in temperature and air flow rate led to a reduction in drying time and an increase in drying rate, both for natural and for pulped coffee. The time spent in drying coffee, considering the same processing method and drying air temperature until reaching a moisture content of 0.125±0.005 kg of water.kg of dry matter⁻¹ (db) in the grain, using the air flow rates of 96 and 132 m³.min⁻¹.m⁻², was statistically equal. The second experiment was performed with the aim of evaluating the correlation between physiological variables (electrical conductivity, potassium leaching and germination percentage) and variables of drying kinetics (time and drying rate), as well as verifying the relationship between the variables of drying kinetics and the sensory quality of the coffee, as a function of the type of processing (natural and pulped), temperature (40 and 45 °C) and drying air flow rates (24 and 96 m³.min⁻¹.m⁻²). After mechanical drying, physiological and sensory quality was evaluated. Results show that dry-processed coffee is more sensitive to mechanical drying with heated air than wet-processed coffee, exhibiting worse physiological performance. Air flow rate does not affect the physiological quality of the pulped and natural coffee. The rise in temperature from 40 to 45°C resulted in a decline in physiological quality only for pulped coffee, and the rise in drying rate by means of higher drying air flow rate for the temperature of 40°C showed negative correlation with the sensory quality of pulped coffee. The third experiment was performed with the aim of evaluating possible changes in sensory quality and in the contents of sucrose, glucose, fructose, raffinose and maltose, both for natural coffee and for pulped coffee, as a function of drying air flow rate (24 and 96 m³.min⁻¹.m⁻²) and drying air temperature (40 and 45°C), as well as correlating the content of these chemical constituents with the sensory quality of the coffee. After drying, the

contents of sucrose, glucose, fructose, raffinose and maltose were quantified using high precision liquid chromatography. We conclude that the content of sugars is not affected by the temperature and by the drying air flow rate. The sucrose, raffinose, maltose, glucose and fructose content does not show a relationship to sensory quality. Natural coffees show greater contents of sucrose, glucose, fructose and maltose, and coffees dried at the temperature of 40°C and air flow rates of 24 m³min⁻¹m⁻² tend to show better sensory quality.

Keywords: *Coffea arabica* L. Drying rate. Mathematical modeling. Multivariate analysis. Chemical composition.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|--|-----|
| ARTIGO 1 | | |
| Figura 1 | Secadores utilizados para a secagem mecânica do café..... | 52 |
| Figura 2 | Taxa de secagem em função do teor de água presente nos frutos de café..... | 59 |
| Figura 3 | Taxa de secagem em função do teor de água presente no café em pergaminho..... | 59 |
| Figura 4 | Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Valcam para a secagem do café despulpado seco a 40 °C, em função do tempo..... | 65 |
| Figura 5 | Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café natural, em função do tempo..... | 65 |
| ARTIGO 2 | | |
| Figura 1 | Secadores utilizados para a secagem mecânica do café..... | 80 |
| Figura 2 | Taxa de secagem em função do teor de água presente no café..... | 89 |
| Figura 3 | Escores das variáveis canônicas identificadas pelo tipo de processamento e fluxo de ar de secagem..... | 94 |
| Figura 4 | Escores das variáveis canônicas identificadas pelo tipo de processamento e temperatura do ar de secagem..... | 95 |
| ARTIGO 3 | | |
| Figura 1 | Secadores utilizados para a secagem mecânica do café..... | 109 |
| Figura 2 | Curva de secagem do café natural e despulpado..... | 117 |
| Figura 3 | Biplot dos dois primeiros eixos da análise de componentes principais para dados de dois tipos de processamento (N = natural e CD = despulpado), duas temperaturas do ar de secagem (40 = 40 °C e 45 = 45 °C) e dois fluxos de ar de secagem (24 = 24 m ³ .m ⁻¹ .m ⁻² e 96 = 96 m ³ .m ⁻¹ .m ⁻²), em função dos teores médios de alguns açúcares. sac = sacarose; raf = rafinose; mal = maltose; fru = frutose; gli = glicose..... | 121 |

Figura 4 Biplot dos dois primeiros eixos da análise de componentes principais para dados de dois tipos de processamento (N = natural e CD = despulpado), duas temperaturas do ar de secagem (40 = 40 °C e 45 = 45 °C) e dois fluxos de ar de secagem (24 = 24 m³.m⁻¹.m⁻² e 96 = 96 m³.m⁻¹.m⁻²), em função dos teores médios de alguns açúcares, nota sensorial final e de alguns atributos sensoriais. sac = sacarose; raf = rafinose; mal = maltose; Total = nota sensorial final; finaliz = finalização; aroma = fragrância/aroma.....

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Tipo de processamento, natural (NAT) e despulpado (CD), temperatura (Tem) e fluxo do ar de secagem..... | 53 |
| Tabela 2 | Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem..... | 54 |
| Tabela 3 | Tipo de processamento, natural (NAT) e despulpado (CD), fluxo de ar, tempo de secagem, teor de água inicial e final, taxa de secagem média e máxima do café natural e despulpado, em função da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem..... | 57 |
| Tabela 4 | Valores de coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P), obtidos para os modelos utilizados para descrever a cinética de secagem do café natural e despulpado, para diferentes temperaturas e fluxos de ar..... | 60 |
| Tabela 5 | Tendência de distribuição dos resíduos (A = aleatória; T = tendenciosa) para os onze modelos analisados, durante a secagem mecânica do café natural e despulpado submetidos a diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem..... | 63 |
| Tabela 6 | Coefficientes do modelo de Valcam e Midilli ajustados aos dados experimentais de secagem de café despulpado seco a 40 °C e natural em camada fina..... | 64 |
| Tabela 7 | Valores médios de tempo de secagem (horas), até o café atingir $0,125 \pm 0,005$ kg de água.kg de matéria seca ⁻¹ (bs) no grão, para o café despulpado, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem..... | 66 |
| Tabela 8 | Valores médios de tempo de secagem (horas), até o café atingir $0,125 \pm 0,005$ kg de água.kg de matéria seca ⁻¹ (bs) no grão, para o café natural, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem..... | 67 |
| ARTIGO 2 | | |
| Tabela 1 | Tipo de processamento, natural (NAT) e despulpado (CD), temperatura (Tem) e fluxo do ar de secagem..... | 81 |
| Tabela 2 | Tempos e taxas (Tx) de secagens médias até meia-seca (MS) e até o final da secagem (Final), teor de água inicial, na meia-seca e no final da secagem, em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despulpado (CD), da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem..... | 87 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Tabela 3 | Taxa de secagem média (TxM), condutividade elétrica (CE), lixiviação de potássio (LK), porcentagem de germinação e análise sensorial, em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despulpado (CD), da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem..... | 90 |
| Tabela 4 | Teste de Bartlett para verificação da existência de correlação entre os dois conjuntos de dados representados pelas variáveis fisiológicas e de cinéticas de secagem..... | 91 |
| Tabela 5 | Correlações das variáveis fisiológicas com as variáveis canônicas..... | 92 |
| Tabela 6 | Correlações das variáveis de cinética com as variáveis canônicas..... | 93 |
| Tabela 7 | Valores dos coeficientes de correlação entre a análise sensorial e as variáveis de cinética de secagem (tempos e taxas de secagem até a meia-seca e até o final da secagem), para os fluxos de 24 e 96 m ³ .min ⁻¹ .m. ⁻² , em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despulpado (CD) e da temperatura do ar de secagem(Tem). | 96 |
| ARTIGO 3 | | |
| Tabela 1 | Tipo de processamento, natural (NAT) e despulpado (CD), temperatura (Tem) e fluxo do ar de secagem..... | 110 |
| Tabela 2 | Tempo de secagem, teor de água inicial e final e taxa de secagem média, em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despulpado (CD), da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem..... | 116 |
| Tabela 3 | Teores médios de sacarose, rafinose, frutose, glicose e maltose, nota da análise sensorial total e dos atributos aroma, sabor, corpo e finalização em função do processamento, temperatura e fluxo de ar de secagem..... | 119 |
| Tabela 4 | Correlações entre os parâmetros avaliados (sacarose, rafinose, frutose, glicose e maltose) e os dois primeiros componentes principais..... | 122 |
| Tabela 5 | Correlações entre os parâmetros avaliados (sacarose, rafinose, maltose, nota sensorial final e dos atributos sensoriais aroma, sabor, corpo e finalização) e os dois primeiros componentes principais..... | 124 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|------------|
| | PRIMEIRA PARTE | |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 18 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 20 |
| 2.1 | Cafés especiais..... | 20 |
| 2.2 | Colheita e processamento do café..... | 21 |
| 2.3 | Secagem do café..... | 23 |
| 2.3.1 | Teoria da secagem..... | 24 |
| 2.3.2 | Taxa de secagem..... | 25 |
| 2.3.3 | Modelagem matemática e simulação da secagem do café..... | 27 |
| 2.4 | Avaliação da qualidade do café..... | 29 |
| 2.4.1 | Análise sensorial..... | 29 |
| 2.4.2 | Análises fisiológicas..... | 30 |
| 2.4.2.1 | Condutividade elétrica e lixiviação de potássio..... | 30 |
| 2.4.2.2 | Teste de germinação..... | 31 |
| 2.4.3 | Análises químicas..... | 31 |
| | REFERÊNCIAS..... | 34 |
| | SEGUNDA PARTE - ARTIGOS..... | 44 |
| | ARTIGO 1 Influência da temperatura e do fluxo de ar na cinética de secagem do café natural e despoldado..... | 45 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 47 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 50 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 57 |
| 4 | CONCLUSÕES..... | 68 |
| | REFERÊNCIAS..... | 69 |
| | ARTIGO 2 Qualidade fisiológica e sensorial do café arábica submetido a diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem..... | 74 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 76 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 79 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 87 |
| 4 | CONCLUSÕES..... | 98 |
| | REFERÊNCIAS..... | 99 |
| | ARTIGO 3 Efeito do fluxo de ar de secagem na qualidade sensorial e no conteúdo de açúcares do café arábica..... | 103 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 105 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 108 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 116 |

| | | |
|----------|-------------------------|------------|
| 4 | CONCLUSÕES..... | 126 |
| | REFERÊNCIAS..... | 127 |

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O café representa importante fonte de renda para a economia brasileira, sendo o segundo produto na pauta das exportações agrícolas do país. O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com estimativa de produção, para a safra 2013, de 48,59 milhões de sacas do produto beneficiado. Deste volume, 36,41 milhões de sacas são da espécie *Coffea arabica* L. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013).

Apesar de ser líder no mercado mundial e de se apresentar tecnologicamente preparado para oferecer altas produtividades e elevadas velocidades de colheita, o Brasil necessita de uma nova tecnologia ou metodologia de secagem, que permita reduzir o tempo sem alterar a qualidade da bebida. Este fato tornou a etapa de secagem o grande gargalo da cafeicultura empresarial brasileira.

O café recém-colhido difere dos demais grãos cultivados em larga escala por apresentar certas peculiaridades, tais como alto teor de água, aproximadamente 60% (bu) e desuniformidade com relação à maturação. Logo, o processo de secagem é uma etapa fundamental para evitar o ataque de microrganismos e de fermentações que podem comprometer a qualidade do café. Além disso, a etapa de secagem é importante, tanto sob o aspecto de consumo de energia como na influência que essa operação tem sobre a qualidade final do produto (BORÉM, 2008; RESENDE et al., 2009).

A tecnologia disponível atualmente para secagem do café só permite o aumento da taxa de secagem pelo aumento da temperatura, ou do fluxo de ar. Porém, temperaturas da massa de café acima de 40 °C causam danos térmicos que depreciam a qualidade do café (ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2012).

O desenvolvimento de tecnologias de secagem que proporcionem rápida desidratação sem o uso de temperaturas elevadas de secagem é uma alternativa altamente promissora, principalmente com relação à redução do tempo de secagem. O aumento da taxa de secagem, sem ultrapassar o limite máximo de temperatura tolerável pelo café, pode ser alcançado com a utilização de fluxos de ar de secagem maiores que os utilizados comercialmente, podendo trazer grandes benefícios para a cafeicultura brasileira, tanto do ponto de vista operacional como do financeiro. No entanto, antes de serem recomendados em escala comercial, necessitam ser testados experimentalmente.

Neste contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar os efeitos da taxa de secagem na qualidade do café processado pela via seca e via úmida, bem como estudar a cinética de secagem para diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem.

Os objetivos específicos foram:

- avaliar a cinética de secagem do café natural e despulpado, ajustando modelos matemáticos aos valores experimentais em função do fluxo e temperatura do ar de secagem;
- propor fluxos de ar para a secagem de café arábica, processado via seca e via úmida, que acelerem o processo de secagem;
- avaliar a qualidade sensorial e fisiológica do café natural e despulpado, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem utilizado;
- avaliar se ocorrem alterações nos teores de sacarose, glicose, frutose, rafinose e maltose, tanto para o café natural como para o despulpado, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem utilizados, e relacionar o teor destes constituintes químicos com a qualidade sensorial do café.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cafés especiais

A demanda pelos grãos especiais cresce em torno de 15% ao ano, contra um crescimento de cerca de 2% do café commodity. O segmento representa, hoje, cerca de 12% do mercado internacional da bebida. O valor de venda atual, para alguns cafés diferenciados, tem um sobrepreço que varia entre 30% e 40% a mais em relação ao café cultivado de modo convencional. Em alguns casos, pode ultrapassar a barreira dos 100% (BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION - BSCA, 2013).

Os números do mercado interno mostram que o café especial está caindo no gosto do brasileiro. Segundo a BSCA (2012), em 2008, das 17 milhões de sacas de café consumidas no país, apenas 500 mil eram especiais. Em 2011, das 20 milhões de sacas consumidas por aqui, um milhão era de café especial.

Os cafés especiais não podem apresentar qualquer tipo de defeito na bebida, obtendo, no mínimo, 80 pontos na escala de classificação de cafés especiais da Associação Americana de Cafés Especiais (SCAA, sigla em inglês), o que equivale a um café de bebida mole, de acordo com a Instrução Normativa nº 8 (BRASIL, 2003), além de apresentar qualidade diferenciada e elevado potencial de expressão de aroma e sabor (GIOMO; BORÉM, 2011).

A definição de café especial está intimamente ligada ao prazer que a bebida pode proporcionar ao consumidor, por meio de algum atributo específico, processo de produção ou serviço a ele associado. Portanto, diferencia-se dos cafés comuns por características como qualidade superior da bebida, aspecto dos grãos, forma de colheita, tipo de preparo, história, origem dos plantios, cultivares e quantidades limitadas, entre outras. 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 a percepção sensorial proporcionada ao consumidor (GIOMO; BORÉM, 2011). Segundo Paiva (2005), um café especial é sinônimo de café fino ou de qualidade superior que apresente alguma característica que o diferencie dos outros, como o sabor remanescente floral, cítrico ou achocolatado, entre outros, o que contribui para agregar valor ao produto.

2.2 Colheita e processamento do café

A colheita do café pode ser mecanizada, semimecanizada ou manual, sendo, geralmente, realizada de duas formas: derriça completa ou colheita seletiva. Na derriça completa, método predominante no Brasil, os frutos são derriçados do cafeeiro sobre pano colocado no chão ou diretamente no chão, obtendo-se um produto bastante heterogêneo, constituído de frutos maduros (cereja), imaturos (verdes) e sobremaduros (passa e seco), além de outros materiais e impurezas, como folhas, ramos, paus, terra, pedras, etc. Já na colheita seletiva, são colhidos apenas os frutos maduros (BORÉM, 2008).

O café, após ser colhido, 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 (BRANDO, 2004).

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

São utilizados, basicamente, dois métodos para o processamento do café, a via seca e a via úmida. O processamento por via seca consiste em secar os frutos na sua forma integral, ou seja, com exocarpo (casca), mesocarpo (polpa e mucilagem) e endocarpo (pergaminho), originando o que é conhecido como café em coco ou natural. Já o processamento por via úmida, que origina os cafés em pergaminho, pode ser realizado de diferentes formas: removendo-se a casca e parte da mucilagem mecanicamente, dando origem ao café descascado; removendo-se a casca mecanicamente e a mucilagem por fermentação biológica, originando o café despulpado ou removendo-se a casca e a mucilagem mecanicamente, dando origem ao café desmucilado (BORÉM, 2008).

A etapa de processamento do café tem por finalidade promover a separação dos frutos em lotes mais homogêneos. Tal separação pode ser feita pelo estágio de maturação, teor de água, tamanho e densidade, dentre outros, o que facilita as operações posteriores, principalmente a secagem, evitando-se possíveis comprometimentos na qualidade da bebida.

O tipo de processamento do café é variável entre os produtores, dependendo, principalmente, dos aspectos climáticos, tecnológicos, econômicos e exigências do mercado consumidor quanto às características do produto (BORÉM, 2008).

Cafés processados por via úmida e por via seca apresentam características sensoriais distintas. De modo geral, os cafés naturais originam bebidas mais encorpadas, mais doces e com menor acidez, sendo ingrediente essencial para ligas de café expresso. Porém, encontram-se, na literatura, trabalhos que associam os cafés processados por via úmida a bebidas superiores, em comparação com os cafés processados por via seca (ILLY; VIANI, 1995; VILLELA, 2002; VINCENT, 1987; WILBAUX, 1963). Essa diferença não deve ser atribuída somente à forma de processamento, mas também à ocorrência de fermentações indesejáveis que, frequentemente, estão associadas ao

processamento por via seca, bem como à ausência de cuidados no momento da colheita e da secagem do café natural. Por outro lado, a colheita do café com baixa proporção de frutos verdes, seguida pela separação hidráulica e por uma secagem cuidadosa, sem a ocorrência de fermentações, permite a produção de cafés naturais de excelente qualidade (BORÉM, 2008).

De acordo com Leloup et al. (2004), o tipo de processamento altera a composição do café cru, bem como suas características sensoriais. Em estudos conduzidos por Bytof et al. (2005) foi demonstrado que, durante o processamento pós-colheita, diversos processos metabólicos ocorrem no interior dos grãos do café, alterando significativamente a composição química do grão cru.

Algumas análises quantitativas de açúcares de baixo peso molecular presentes em grãos crus de café arábica processados por via seca e por via úmida apresentaram diferenças nos conteúdos de glicose e frutose. Cafés processados por via úmida apresentaram menores quantidades desses carboidratos, quando comparados com cafés processados por via seca (KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006).

2.3 Secagem do café

Os frutos do café, geralmente, são colhidos com teor de água variando entre 30% e 65% (bu), dependendo do seu estágio de maturação, estando sujeitos à rápida deterioração. Portanto, antes de ser armazenado, o café deverá ser, necessariamente, seco. Apesar de existirem outras formas de preservação utilizadas para outros alimentos, a secagem é o método mais utilizado para o café. Entre as várias etapas da pós-colheita do café, a secagem é a etapa de maior relevância, tanto do ponto de vista do consumo de energia e formação dos

custos de processamento, como do ponto de vista da manutenção da qualidade do café (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008).

A preservação da qualidade do café pela secagem baseia-se no fundamento de que com a redução da quantidade de água disponível há uma redução da atividade de água e, conseqüentemente, da velocidade das reações químicas, bioquímicas e do desenvolvimento de microrganismos, contribuindo para um armazenamento seguro por períodos maiores (CHRISTENSEN; KAUFMANN, 1974).

2.3.1 Teoria de secagem

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

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

O fenômeno de migração de água do interior de grãos ainda não é bem conhecido. Numerosos mecanismos térmicos e físicos têm sido propostos para descrever o transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Em determinados produtos, o processo de secagem, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem,

pode ser dividido em um período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente.

O período de velocidade constante ocorre nas primeiras horas de secagem, quando o café se encontra com teor de água elevado. Nesse período, a temperatura do produto mantém igual a do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam, ou seja, a energia perdida na forma de calor sensível é recuperada na forma de calor latente de vaporização. O mecanismo interno de fluxo de água não afeta a velocidade de secagem porque a taxa interna de deslocamento de água para a superfície do produto é igual ou maior do que a máxima taxa de remoção de vapor d'água pelo ar, sendo evaporada apenas a água retida por capilaridade (BORÉM, 2008).

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. Nesta fase ocorrem os maiores riscos de perda de qualidade por danos térmicos (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

2.3.2 Taxa de secagem

A taxa de secagem pode ser definida como relação entre a quantidade de água que é perdida pelo produto em certo período de tempo. É influenciada por vários fatores, principalmente pelo método de secagem, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, umidade inicial do produto e tempo de exposição do produto à temperatura de secagem, entre outros. A falta do controle desses fatores pode comprometer a qualidade do produto final (BORÉM, 2008).

Para Burmester e Eggers (2010), a taxa de secagem é influenciada, principalmente, pela temperatura do ar de secagem. Temperaturas mais altas tornam a secagem mais rápida e, portanto, mais econômica. Herman-Lara et al. (2010) verificaram um aumento na taxa de secagem, provocado pela elevação da temperatura e do fluxo de ar de secagem.

Abdelmotaleb (2009), avaliando o efeito de quatro níveis de temperatura (45, 55, 65 e 75 °C) e três níveis de velocidade do ar (0,25; 0,75 e 1,25 m.s⁻¹) na secagem convectiva de fatias de alho em camadas, encontraram aumento na taxa de secagem com a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem. No entanto, o consumo específico de energia reduziu com a elevação da temperatura e aumentou para maiores fluxos de ar. Alterando-se a temperatura de 45-75 °C, para a velocidade de 0,25 m.s⁻¹ do ar, o tempo de secagem diminuiu de 840 para 300 min e o consumo específico de energia reduziu de 41,37 para 17,78 MJ.kg⁻¹ de água evaporada. Já na velocidade de 1,25 m.s⁻¹, o tempo de secagem diminuiu de 600 para 165 min e o consumo específico de energia caiu de 73,8 para 50,91 MJ.kg⁻¹ de água evaporada.

Yemmireddy (2013), estudando o efeito de diferentes métodos de secagem (ar forçado com velocidade de 0,4 m.s⁻¹, leito fluidizado com velocidade do ar de ≈45 m.s⁻¹, secador de impacto de ar com fluxos reversíveis a uma velocidade de ≈1,4 m.s⁻¹ e um secador convectivo com velocidade do ar de ≈1,6 m.s⁻¹) no tempo de secagem de *blueberries rabbiteye*, encontraram o menor e o maior tempo de secagem para o secador de leito fluidizado e para o secador com ar forçado com velocidade de 0,4 m.s⁻¹, respectivamente.

Borsato, Doni-Filho e Ahrens, (2005), estudando o efeito da aplicação de cinco diferentes fluxos de ar (10, 60, 110, 160 e 210 m³.min⁻¹.t⁻¹) na secagem de camomila, verificaram que a maior taxa de secagem foi obtida no início da secagem para o maior fluxo. Guida e Vilela (1996) avaliaram o efeito de dois fluxos de ar (16 e 63 m³.min⁻¹.m⁻²) na secagem estacionária de café despulpado,

utilizando temperatura de 70 °C e verificaram que o aumento do fluxo de ar reduziu em mais de 50% o tempo total de secagem. Porém, a utilização do menor fluxo produziu cafés com melhor aspecto, indicando que o aumento do fluxo de ar com consequente aumento da taxa de secagem influencia negativamente a aparência do grão.

Isquierdo et al. (2013), estudando o efeito da taxa de secagem em função da utilização de ar de secagem com diferentes umidades relativas na qualidade do café natural, 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.

Ribeiro et al. (2003), estudando a cinética de secagem de café cereja descascado, observaram que, independentemente da temperatura do ar de secagem (40, 45 e 50 °C), o aumento do fluxo de ar de 20 m³.min⁻¹.m⁻² para 30 m³.min⁻¹.m⁻² tem efeito significativo na taxa de redução de água apenas na primeira hora de secagem, e que o fluxo de ar não teve influência na qualidade sensorial da bebida.

A tecnologia disponível atualmente para secagem de café só permite que a taxa de secagem seja aumentada com o aumento da temperatura e do fluxo de ar, porém, em diversas pesquisas tem sido demonstrado que, quando se visa à produção de cafés de qualidade superior, a temperatura da massa de café não pode ultrapassar 40 °C (BORÉM et al., 2006; BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA, 2010; SAATH et al., 2010; TAVEIRA, 2012).

2.3.3 Modelagem matemática e simulação da secagem do café

De acordo com Resende et al. (2010), a simulação matemática do processo de secagem é fundamental para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos.

Na literatura são descritos vários métodos (teóricos, semiempíricos e empíricos) para se analisar a secagem de produtos higroscópicos (BURMESTER; EGGERS, 2010; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; ISQUIERDO et al., 2013; NILNONT et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011).

Os métodos semiempíricos e empíricos de análise do processo de secagem, que geralmente baseiam-se nas condições externas ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem, entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e massa no interior dos grãos. Esses métodos baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, presumindo-se que, durante a secagem, as condições são isotérmicas e que a transferência de água se restringe à superfície do produto. Já os métodos teóricos, normalmente, consideram não somente as condições externas, mas também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos (ANDRADE; BORÉM, 2008).

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; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Diversos modelos têm sido ajustados para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos. Dentre eles, estão os modelos de Midilli, de Page, de Thompson, de Verma, de Henderson e Pabis, de Henderson e Pabis modificado, de dois termos, de exponencial de dois termos,

de Newton, de Wang e Sing e de Valcam (AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; GONELI et al., 2009; ISQUIERDO et al., 2013; KASHANINEJAD et al., 2007; MOHAPATRA; RAO, 2005; RESENDE et al., 2009, 2010, 2011; SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012, 2013).

2.4 Avaliação da qualidade do café

2.4.1 Análise sensorial

A análise sensorial do café é realizada por meio dos órgãos do sentido, tato, olfato e principalmente paladar. Apesar de parecer uma avaliação subjetiva, é o método mais utilizado para a caracterização da qualidade de bebida do café e, ainda que seja passível de erros, não há, até o presente momento, outra opção, por se tratar de uma análise extremamente complexa, envolvendo a manifestação de aromas e sabores na bebida.

A qualidade do café é determinada, principalmente, pelo seu sabor e aroma, formados durante a torração a partir de compostos químicos presentes no grão cru. Porém, a presença desses precursores no grão cru depende de fatores genéticos, ambientais e tecnológicos, como os métodos de processamento e secagem (FARAH et al., 2006; MALTA; CHAGAS; OLIVEIRA, 2003).

Dentre as metodologias disponíveis para a avaliação sensorial do café, é, tradicionalmente, utilizada no Brasil, a prova de xícara, seguindo as recomendações da Instrução Normativa nº 08 do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2003). Mas, essa é uma análise subjetiva e restrita, podendo, ainda, variar de degustador para degustador. Isso porque os procedimentos para a sua realização são menos criteriosos que o de outras metodologias, principalmente quanto à torra do café, fazendo com que esse tipo

de avaliação seja empregado exclusivamente para o café commodity, classificando-o em bebida estritamente mole, mole, apenas mole, dura, riado, rio e rio zona.

Para a avaliação de cafés especiais, têm sido adotados, com maior frequência, métodos de análises sensoriais descritivas, pelos quais os degustadores conferem notas a cada atributo sensorial da bebida. Dentre as metodologias disponíveis para análise sensorial, considera-se a mais adequada a proposta por Lingle (2011), adotada pela SCAA, que considera como especiais os cafés que apresentam nota final igual ou acima de 80 pontos. Nessa avaliação sensorial, os atributos são agrupados em duas categorias, sendo uma subjetiva, representada por fragrância/aroma, sabor, sabor residual, acidez, corpo, equilíbrio e impressão global, pontuados segundo a sua qualidade em uma escala de 6 a 10 pontos, com intervalos de 0,25 pontos, e uma objetiva, representada pela uniformidade, xícara limpa e doçura, pontuados em uma escala de 0 a 10 pontos. A nota final de cada amostra é representada pela soma de todos os atributos; para cada amostra são avaliadas cinco xícaras.

2.4.2 Análises fisiológicas

2.4.2.1 Condutividade elétrica e lixiviação de potássio

Durante a secagem do café, se mal conduzida, podem ocorrer alterações fisiológicas que comprometem a qualidade da bebida. O teste de lixiviação de potássio, assim como o de condutividade elétrica, tem sido utilizado para indicar possíveis danos ao sistema de membranas celulares (ANGÉLICO et al., 2011; BORÉM et al., 2008; CORADI et al., 2007; ISQUIERDO et al., 2011, 2012; MARQUES et al., 2008; NOBRE et al., 2011; REINATO et al., 2012; RIBEIRO et al., 2011; SAATH et al., 2012; SANTOS; CHALFOUN; PIMENTA, 2009).

Grãos com membranas mal estruturadas, desorganizadas e danificadas, em consequência de altas taxas de secagem provocadas por elevadas temperaturas, lixiviam maior quantidade de solutos, quando são imersos em água, apresentando maiores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio (KRZYZANOWSKY; FRANÇA NETO; HENNING, 1991; PRETE, 1992), indicando perda de qualidade.

2.4.2.2 Teste de germinação

A preocupação com a viabilidade das sementes do cafeeiro é antiga. O aparecimento de injúrias em sementes de café, no processamento e na secagem, tem sido apontado como uma das principais causas de perda de qualidade fisiológica (ZONTA, 2007). Segundo o autor, durante o processo de secagem, as sementes sofrem mudanças físicas, provocadas por gradientes de temperatura e umidade, que ocasionam a redução da porcentagem e da velocidade da germinação, além de aumentar o percentual de plântulas anormais. Diante disso, alguns trabalhos de pesquisa têm sido realizados buscando relacionar a perda da qualidade fisiológica com a redução da qualidade sensorial em grãos de café (OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009).

2.4.3 Análises químicas

Acredita-se que, além dos fatores genéticos e ambientais e dos tratamentos culturais utilizados na condução e manejo da lavoura cafeeira, diferenças no sabor e no aroma dos cafés são atribuídas a diversas alterações físico-químicas, fisiológicas e bioquímicas que ocorrem nos grãos ou nas sementes, durante o processamento e a secagem.

Pesquisas estão sendo desenvolvidos na tentativa de relacionar os componentes físico-químicos do grão e a qualidade do café, com o objetivo de auxiliar a classificação sensorial (BERTRAND et al., 2008; FARAH et al., 2006; LOPES, 2000; MALTA et al., 2003; PEREIRA, 1997; SILVA et al., 2005; VILLELA, 2002).

O conteúdo de carboidratos, cuja composição geral é $C_x(H_2O)_y$ (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010), presente nos grãos crus de café é evidente e constitui a metade do seu peso seco. Carboidratos de baixo e alto peso molecular estão presentes nos grãos crus de café e ambos participam de várias reações químicas associadas com o processo de torra (BRADBURY, 2001), como a reação de Maillard e/ou caramelização, que é uma das responsáveis pela formação da cor, do sabor e do aroma peculiares da bebida do café (PEREIRA, 1997).

Os açúcares de baixo peso molecular estão presentes no café beneficiado grão cru, contribuindo com a doçura da bebida, que é considerada um dos atributos mais desejáveis nos cafés especiais, além de participar de reações importantes (CORADI et al., 2007; MARQUES et al., 2008). Dentre esses, destaca-se a sacarose, por estar presente em maior quantidade, podendo variar de 1,9% a 10% na matéria seca (KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006; LIMA, 2005; LIMA et al., 2010; MENDONÇA et al., 2007; VILAS BOAS et al., 2001).

Figueiredo (2013), estudando a influência dos fatores genéticos e ambientais sobre a qualidade de cafés especiais, verificou que o conteúdo de sacarose foi um bom discriminador da qualidade de cafés especiais, sendo que cafés com qualidade superior apresentaram maiores teores de sacarose.

Vários trabalhos vêm mostrando que, em grãos crus de café, o conteúdo de glicose, frutose e aminoácidos livres (ácido γ -amino butírico) é variável, dependendo da forma de processamento (KLEINWÄCHTER; SELMAR, 2010; LELOUP et al., 2004; SELMAR et al., 2004).

A doçura é uma das características de sabor mais desejáveis nos cafés gourmets e a presença de certos compostos orgânicos no café cru pode servir de padrão na avaliação da qualidade, segundo a Organização Internacional do Café - OIC (1991). No entanto, sabe-se que a sacarose é degradada praticamente quase que em sua totalidade, durante a torração, originando açúcares menores, precursores de ácidos e aldeídos, responsáveis pelo aroma.

REFERÊNCIAS

ABDELMOTALEB, A. Thin layer drying of garlic slices using convection and combined (convection - infrared) heating modes. **Misr Journal of Agricultural Engineering**, Cairo, v. 26, n. 1, p. 251-281, Jan. 2009.

AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 73, n. 1, p. 75-84, Jan. 2006.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. Modelagem matemática e simulação aplicados na secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 301-347.

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

ANGÉLICO, C. L. et al. Diferentes estádios de maturação e tempos de ensacamento sobre a qualidade do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 8-19, jan./abr. 2011.

BERTRAND, B. et al. Comparison of the effectiveness of fatty acids, chlorogenic acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) varieties and growing origins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 56, n. 6, p. 2273-2280, Feb. 2008.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. v. 1, 631 p.

BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café natural e despolpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1605-1615, set./out. 2008.

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

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

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

BORSATO, A. V.; DONI-FILHO, L.; AHRENS, D. C. Secagem da camomila [*Chamomilla recutita* (L.) Raeuchert] com cinco vazões específicas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v. 7, n. 3, p. 65-71, 2005.

BRADBURY, A. G. W. Chemistry I: non-volatile compounds, part 1A: carbohydrates. In: CLARKE, R. J.; VITZTHUM, O. G. (Ed.). **Coffee recent developments**. Oxford: Blackwell Science, 2001. p. 1-17.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 08**, de 11 de junho de 2003. Aprova o regulamento técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado grão cru. Brasília, 2003. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=consultarLegislacaoFederal>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. **Mercado de cafés especiais no Brasil dobra em três anos**. Disponível em: <<http://bsca.com.br/noticia.php?id=118>>. Acesso em: 11 nov. 2012.

BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION. **O que são cafés especiais.** Disponível em: <<http://bsca.com.br/cafes-especiais.php>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

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

BYTOF, G. et al. Influence of processing on the generation of γ -aminobutyric acid in green coffee beans. **European Food Research Technology**, Heidelberg, v. 220, n. 3, p. 245-250, 2005.

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.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café, safra 2013 segunda estimativa, maio/2013.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 21 jul. 2013.

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

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

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de alimentos de Fennema**. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, London, v. 41, n. 5, p. 789-795, June 2008.

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

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. **Abordagem sensorial e química da expressão de genótipos de Bourbon em diferentes ambientes**. 2013. 127 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

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

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

GUIDA, V. F. A. A.; VILELA, E. R. Influência do fluxo de ar e do período de descanso na secagem do café (*Coffea arabica* L.) despulpado em secador experimental de camada fixa. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 232-237, abr./jun. 1996.

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

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

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

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

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.

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

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

KLEINWÄCHTER, M.; SELMAR, D. Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees. **Food Chemistry**, Oxford, v. 119, n. 2, p. 500-504, Mar. 2010.

KNOPP, S.; BYTOF, G.; SELMAR, D. Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. **European Food Research and Technology**, Berlin, v. 223, n. 2, p. 195-201, 2006.

KRZYZANOWSKY, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. Relatos dos testes de vigor disponíveis as grandes culturas. **Informativo ABRATES**, Brasília, v. 1, n. 2, p. 15-50, mar. 1991.

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.

LIMA, A. R. et al. Compostos bioativos do café: atividade antioxidante in vitro do café verde e torrado antes e após a descafeinação. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 20-24, jan. 2010.

LIMA, D. M. **Armazenabilidade de sementes de *Coffea arabica* L. e de *Coffea canephora* Pierre, submetidas a diferentes métodos de desmucilagem e de secagem.** 2005. 106 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

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

LOPES, L. M. V. **Avaliação da qualidade de grãos crus e torrados de cultivares de cafeeiro (*Coffea arabica* L.).** 2000. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

MALTA, M. R.; CHAGAS, S. J. de R.; OLIVEIRA, W. M. de. Composição físico-química e qualidade do café submetido a diferentes tipos de processamento: natural, descascado e desmucilado. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2003. p. 259.

MALTA, M. R. et al. Composição química, produção e qualidade do café fertilizado com diferentes fontes e doses de nitrogênio. **Revista Ciência e Tecnologia**, Lavras, v. 27, n. 6, p. 1246-1252, dez. 2003.

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.

MENDONÇA, L. M. V. L. et al. Composição química de grãos crus de cultivares de *Coffea arabica* L. suscetíveis e resistentes à *Hemileia vastatrix* Berg et Br. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 413-419, mar./abr. 2007.

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, Feb. 2005.

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

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.

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

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

ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL CAFÉ. **Estudios de investigación de evaluación sensorial sobre la calidad del café cultivado en la región de Patrocinio en el Estado de Minas Gerais en Brasil**. London, 1991. 28 p.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: J. Wiley, 1998. 303 p.

PAIVA, E. F. F. **Análise sensorial dos cafés especiais do Estado de Minas Gerais**. 2005. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

PEREIRA, R. G. F. A. **Efeito da inclusão de grãos defeituosos na composição química e qualidade do café (*Coffea arabica* L.) “Estritamente Mole”**. 1997. 96 p. Tese (Doutorado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

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

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

RESENDE, O. et al. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora Pierre*) em terreiro de chão batido. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 247-256, 2010.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.

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

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

RIBEIRO, F. C. et al. Storage of green coffee in hermetic packing injected with CO₂. **Journal of Stored Products Research**, London, v. 47, n. 4, p. 341-348, 2011.

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.

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.

SELMAR, D. et al. Biochemical insights into coffee processing: quality and nature of green coffee are interconnected with an active seed metabolism. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN COFFEE SCIENCE, 20., 2004, Bangalore. **Proceedings...** Bangalore: ASIC, 2004. 1 CD-ROM.

SILVA, E. A. et al. The influence of water management and environmental conditions on the chemical composition and beverage quality of coffee beans. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 229-238, 2005.

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.

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. 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. 1511-1517, out. 2012.

VILAS BOAS, B. M. de et al. Seleção de extratores e tempo de extração para determinação de açúcares em café torrado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 5, p. 1169-1173, set./out. 2001.

VILLELA, T. C. **Qualidade de café despulpado, desmucilado, descascado e natural, durante o processo de secagem.** 2002. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

VINCENT, J. C. Green coffee processing. In: CLARKE, R. J.; MACRAE, R. (Ed.). **Technology**. London: Elsevier, 1987. p. 1-33.

WILBAUX, R. **Agricultural engineering**. Rome: FAO, 1963. 293 p. (Informal Working Bulletin, 20).

YEMMIREDDY, V. K. Effect of drying method on drying time and physico-chemical properties of dried rabbiteye blueberries. **Food Science and Technology**, Trivandrum, v. 50, n. 2, p. 739-745, Mar. 2013.

ZONTA, J. B. **Teste ler café: adequação e aplicação para avaliar a qualidade de sementes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.).** 2007. 79 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

SEGUNDA PARTE

ARTIGOS

ARTIGO 1

Influência da temperatura e do fluxo de ar na cinética de secagem do café natural e despulpado

RESUMO

Diante da importância da secagem na fase da pós-colheita do café e seu reflexo na qualidade final do produto, objetivou-se, neste trabalho, avaliar a cinética da secagem para o café natural e despulpado, utilizando diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem. Para a condução do experimento, utilizaram-se frutos de café (*Coffea arabica* L. cv. Topázio) colhidos manualmente, selecionando-se apenas frutos maduros e, posteriormente, submetidos à separação hidráulica. Para a secagem do café, utilizou-se secador mecânico com duas temperaturas (40 e 45 °C) e quatro fluxos de ar de secagem (24; 60; 96 e 132 m³.min⁻¹.m⁻²). Onze modelos foram empregados para descrever a cinética de secagem do café, com teor de água inicial médio de 2,07 kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs) e 1,00 kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs), para o café natural e o despulpado, respectivamente. O modelo de Valcam foi o que melhor se ajustou para descrever o processo de secagem do café despulpado secado a 40 °C, enquanto, para o café natural, o modelo proposto foi o de Midilli. Nenhum modelo ajustou-se satisfatoriamente para descrever o processo de secagem do café despulpado seco a 45 °C. A elevação da temperatura e do fluxo de ar proporcionou a redução do tempo de secagem e um aumento da taxa de secagem média e máxima, tanto para o café natural como para o despulpado. O tempo gasto para a secagem do café, considerando o mesmo processamento e temperatura do ar de secagem até atingir o teor de água de 0,125±0,005 kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs) no grão, utilizando o fluxo de ar de 96 e 132 m³.min⁻¹.m⁻² é, estatisticamente, igual.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Taxa de secagem. *Coffea arabica* L.

1 INTRODUÇÃO

O café é uma importante fonte de renda para a economia brasileira, sendo o segundo produto na pauta das exportações agrícolas do país. O Brasil é, também, o maior produtor e exportador mundial de café, com estimativa de produção, para a safra 2013, de 48,59 milhões de sacas do produto beneficiado e, deste volume, 36,41 milhões de sacas são da espécie *Coffea arabica* L. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013).

Apesar de ser líder no mercado mundial e se apresentar tecnologicamente preparado para oferecer altas produtividades e elevadas velocidades de colheita, o Brasil necessita de uma nova tecnologia ou metodologia de secagem, que permita reduzir o tempo sem alterar a qualidade da bebida. Este fato tornou a etapa de secagem o grande gargalo da cafeicultura empresarial brasileira.

A tecnologia disponível, atualmente, para a secagem do café só permite o aumento da taxa de secagem pelo aumento da temperatura ou do fluxo de ar. Porém, temperaturas da massa de café acima de 40 °C causam danos térmicos que depreciam a qualidade do café (ISQUIERDO, 2013; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009).

Uma alternativa para aumentar a taxa de secagem sem ultrapassar o limite máximo de temperatura tolerável pelo café pode ser o uso de fluxos de ar de secagem muito maiores que os utilizados comercialmente. No entanto, antes de serem utilizados em escala comercial, necessitam ser testados experimentalmente.

O café recém-colhido difere dos demais grãos cultivados em larga escala, por apresentar certas peculiaridades, tais como alto teor de água, aproximadamente 60% (bu) e desuniformidade em relação à maturação (RESENDE et al., 2009). Logo, o processo de secagem é uma etapa fundamental

para evitar o ataque de microrganismos e de fermentações que irão comprometer a qualidade do café.

Segundo Borém (2008), a etapa de secagem é importante tanto sob o aspecto de consumo de energia como na influência que essa operação tem sobre a qualidade final do produto.

De acordo com Resende et al. (2010), a simulação matemática do processo de secagem é fundamental para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos.

Na literatura são descritos vários métodos (teóricos, semiempíricos e empíricos) para se analisar a secagem de produtos higroscópicos (BURMESTER; EGGERS, 2010; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008; ISQUIERDO, 2013; NILNONT et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011).

Na maioria das vezes, e neste trabalho, os modelos empíricos e semiempíricos, devido à facilidade de uso, têm se mostrado como as 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; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Diversos modelos têm sido ajustados para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos. Dentre eles estão os modelos de Midilli, de Page, de Thompson, de Verma, de Henderson e Pabis, de Henderson e Pabis modificado, de dois termos, de exponencial de dois termos, de Newton, de Wang e Sing e de Valcam (AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA et al., 2010; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; GONELI et al., 2009; ISQUIERDO, 2013; KASHANINEJAD et al., 2007;

MOHAPATRA; RAO, 2005; RESENDE et al., 2009, 2010, 2011; SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012a, 2013).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas, este trabalho foi realizado com os objetivos de estudar a cinética de secagem em camada fina de café (*Coffea arabica* L.), cultivar Topázio; ajustar diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais em função do tipo de processamento, da temperatura e fluxo de ar de secagem e verificar se há diferenças no tempo total de secagem em função dos fluxos de ar estudados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Para condução do experimento utilizaram-se frutos de café (*Coffea arabica* L. cv. Topázio) colhidos manualmente, selecionando apenas frutos maduros ou “cereja” do campo experimental da UFLA. Após a colheita, os frutos foram submetidos à separação hidráulica para a remoção de frutos de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados), seguida de uma seleção manual para a retirada de frutos imaturos e sobremaduros remanescentes. Em seguida, parte dos frutos foi conduzida para os secadores, constituindo a porção “natural” ou processada pela via seca, e a outra parte foi descascada e submetida à fermentação espontânea em água, para a retirada da mucilagem em condições ambiente por 20 horas, formando a porção de café despulpado processado pela via úmida. Após esse período, os cafés em pergaminho foram lavados em água corrente até a completa retirada da mucilagem e, na sequência, o lote de café despulpado foi para o secador.

A secagem foi realizada em secadores mecânicos de camada fixa, os quais permitem o controle do fluxo e da temperatura do ar de secagem com precisão, até o café atingir $0,125 \pm 0,005$ (bs). Durante toda a secagem, o café foi pesado para posterior confecção das curvas, tempos e taxas de secagem. Todos os procedimentos de colheita e processamento foram realizados segundo Borém (2008).

O teor de água dos frutos de café e do café em pergaminho, no início e no fim da secagem, foi determinado utilizando-se o método padrão de estufa, 105 ± 3 °C, durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Já o teor de água do café seco beneficiado foi determinado

pelo método padrão ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2003). Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos e do café em pergaminho, o acompanhamento da secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa) até atingir o teor de água desejado, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g, de acordo com a equação abaixo.

$$U_t = \frac{Ma_i - (Mt_i - Mt_t)}{Mms} \quad (1)$$

em que

U_t : teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

Ma_i : massa de água inicial (kg);

Mt_i : massa total inicial (kg);

Mt_t : massa total no tempo t (kg);

Mms : massa de matéria seca (kg).

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

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

em que

Tx. Sec.: taxa de secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹.h⁻¹);

U_{ant} : teor de água no tempo anterior (g de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

U_{at} : teor de água atual (g de água.kg matéria seca⁻¹ (bs));

Δt : intervalo de tempo entre as pesagens (h).

O sistema de secagem foi composto por três secadores de camada fixa (Figura 1), os quais permitem o controle do fluxo e da temperatura (T) do ar de secagem com precisão, por meio de um painel eletrônico.



Figura 1 Secadores utilizados para a secagem mecânica do café.

Cada secador foi composto por quatro bandejas removíveis com fundos perfurados, tendo, em cada bandeja, sido colocados quatro tubos de seção circular, com diâmetro igual a 0,125 m e altura de 0,17 m, localizados sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar. O café, após ser processado, foi colocado dentro desses tubos, sendo, aproximadamente, 0,17 kg e 0,315 kg cada amostra, o que correspondeu a uma camada fina de 0,025 m e 0,043 m de café processado via úmida e via seca, respectivamente.

A velocidade do ar de secagem foi medida com o uso de um anemômetro de pás, tendo, para todos os tratamentos, sido regulada e mantida constante em 0,4; 1,0; 1,6 e 2,2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, correspondendo aos fluxos de 24; 60; 96 e 132 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente. Foram utilizadas duas temperaturas (40 e 45 $^{\circ}\text{C}$), que foram monitoradas por termômetros de mercúrio colocados no meio da massa de café. Em função das combinações entre processamento, temperatura e

fluxos do ar de secagem, foram obtidas as diferentes condições de secagem (Tabela 1). Para cada tratamento foram realizadas quatro repetições.

Tabela 1 Tipo de processamento, natural (NAT) e despulpado (CD), temperatura (Tem) e fluxo do ar de secagem.

| Processamento | Tem (°C) | Fluxo (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) |
|---------------|----------|---|
| NAT | 40 | 24 |
| | | 60 |
| | | 96 |
| | | 132 |
| | 45 | 24 |
| | | 60 |
| | | 96 |
| | | 132 |
| CD | 40 | 24 |
| | | 60 |
| | | 96 |
| | | 132 |
| | 45 | 24 |
| | | 60 |
| | | 96 |
| | | 132 |

Na análise de dados da 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. Para 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 do 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, (bs));

U_e : teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs)); e

U_i : teor de água inicial do produto (decimal, (bs)).

O teor de água de equilíbrio higroscópico foi calculado pelas equações 4 e 5, para o natural e o despulpado (AFONSO JÚNIOR, 2001), respectivamente.

$$U_e = (2,0222 + 0,0288 \cdot T - 18,7397 \cdot UR^{8,6181})^{-2,1385} \quad (4)$$

$$U_e = (2,9636 + 0,0530 \cdot T - 10,7837 \cdot UR^{4,5136})^{-1,6503} \quad (5)$$

em que

U_e : teor de água de equilíbrio do produto (decimal, (bs));

T : temperatura do ar de secagem, ($^{\circ}\text{C}$);

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

Tabela 2 Modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem.

| Designação do modelo | Modelo | Equação |
|---|---|---------|
| Dois termos ¹ | $RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$ | (6) |
| Exponencial de dois termos ² | $RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$ | (7) |
| Henderson & Pabis modificado ³ | $RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$ | (8) |
| Henderson & Pabis ⁴ | $RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ | (9) |
| Midilli ⁵ | $RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ | (10) |
| Newton ⁶ | $RU = \exp(-k \cdot t)$ | (11) |
| Page ⁷ | $RU = \exp(-k \cdot t^n)$ | (12) |
| Thompson ⁸ | $RU = \exp\{-[a - (a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}] \cdot (2 \cdot b)^{-1}\}$ | (13) |
| Verma ⁹ | $RU = -a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \exp(-k_1 \cdot t)$ | (14) |
| Wang e Sing ¹⁰ | $RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$ | (15) |
| Valcam ¹¹ | $RU = a + b \cdot t + c \cdot t^{1,5} + d \cdot t^2$ | (16) |

¹(HENDERSON, 1974); ²(SHARAF-ELDEE; BLAISDELL; HAMDY, 1980); ³(KARATHANOS, 1999); ⁴(HENDERSON; PABIS, 1961); ⁵(MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002); ⁶(LEWIS, 1921); ⁷(PAGE, 1949); ⁸(THOMPSON; PEARTT; FOSTER, 1968); ⁹(VERMA et al., 1985); ¹⁰(WANG; SING, 1978); ¹¹(SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2013).

em que

- RU: razão de umidade;
- t: tempo de secagem (h);
- k, k_0 e k_1 : constantes de secagem;
- 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 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA). A escolha do melhor modelo baseou-se nos parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), coeficiente de determinação (R^2) e tendência de distribuição dos resíduos. O desvio padrão da estimativa e o erro médio relativo foram calculados, respectivamente, pelas equações 17 e 18.

$$SE = \sqrt{\sum (Y - \hat{Y})^2 / GLR} \quad (17)$$

$$P = \left[(100/n) \sum (|Y - \hat{Y}| / Y) \right] \quad (18)$$

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.

Os tempos de secagem encontrados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial, tendo como fatores as diferentes

temperaturas, os processamentos e os fluxos de ar, em delineamento inteiramente casualizado, e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância, utilizando-se o programa SISVAR® (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os tempos de secagem, o teor de água inicial dos frutos de café e do café em pergaminho, o teor de água final do café beneficiado natural e despolpado, e as taxas de secagem médias e máximas, em função da temperatura e do fluxo de ar de secagem.

Tabela 3 Tipo de processamento, natural (NAT) e despolpado (CD), fluxo de ar, tempo de secagem, teor de água inicial e final, taxa de secagem média e máxima do café natural e despolpado, em função da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem.

| Processamento | Tem (°C) | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | Tempo de secagem (h) | Teor de água (bs) | | Taxa de secagem (g.kg ⁻¹ .h ⁻¹) | |
|---------------|----------|---|----------------------|-------------------|-------|--|--------|
| | | | | Inicial | Final | Média | Máxima |
| NAT | 40 | 24 | 73,20 | 2,19 | 0,125 | 39,84 | 209,25 |
| | | 60 | 71,06 | 2,19 | 0,125 | 41,77 | 217,17 |
| | | 96 | 67,92 | 2,19 | 0,125 | 42,44 | 223,33 |
| | | 132 | 66,10 | 2,20 | 0,125 | 44,16 | 234,27 |
| | 45 | 24 | 47,93 | 1,93 | 0,125 | 43,78 | 222,09 |
| | | 60 | 45,84 | 1,93 | 0,125 | 45,57 | 240,23 |
| | | 96 | 44,08 | 1,96 | 0,125 | 47,57 | 239,78 |
| | | 132 | 44,46 | 1,95 | 0,125 | 48,79 | 256,78 |
| CD | 40 | 24 | 13,30 | 0,98 | 0,125 | 64,27 | 164,85 |
| | | 60 | 12,84 | 0,99 | 0,125 | 69,91 | 177,63 |
| | | 96 | 12,59 | 0,99 | 0,125 | 70,24 | 177,99 |
| | | 132 | 12,13 | 0,99 | 0,125 | 76,45 | 178,19 |
| | 45 | 24 | 10,65 | 1,00 | 0,125 | 80,35 | 210,79 |
| | | 60 | 10,44 | 1,01 | 0,125 | 81,24 | 211,08 |
| | | 96 | 10,10 | 1,01 | 0,125 | 88,77 | 211,20 |
| | | 132 | 10,15 | 1,01 | 0,125 | 88,27 | 221,00 |

Verifica-se que, para o fluxo de 24 m³.min⁻¹.m⁻², o aumento da temperatura (40-45 °C) proporcionou uma redução de 35% (73,20-47,93 horas) e 20% (13,30-10,65 horas) no tempo de secagem para o café natural e despolpado, respectivamente. Aumentando-se o fluxo de ar

(24-132 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), para o café natural, observa-se uma redução de 10% (73,20-66,10 horas) e 7% (47,93-44,46 horas) no tempo de secagem, para as temperaturas de 40 °C e 45 °C. Já a mesma elevação do fluxo de ar, para o café despulpado, proporcionou redução de 9% (13,30-12,13 horas) e 5% (10,65-10,15 horas), para as temperaturas de 40 °C e 45 °C.

Com o aumento da temperatura do ar, há uma maior diferença entre a pressão de vapor do ar de secagem e do produto, fazendo com que a água seja removida com mais facilidade e rapidez (SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012b). Outros fatores que podem ser atribuídos à redução do tempo de secagem, em função do aumento da temperatura, são: o aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente a resistência do fluido ao escoamento e a diminuição da viscosidade facilita a difusão das moléculas de água nos capilares do produto (CORRÊA et al., 2010), além de proporcionar um aumento no nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para a elevação da taxa de secagem.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as taxas de secagem em função do teor de água nos frutos de café e do café em pergaminho, submetidos à secagem completa em secador, respectivamente.

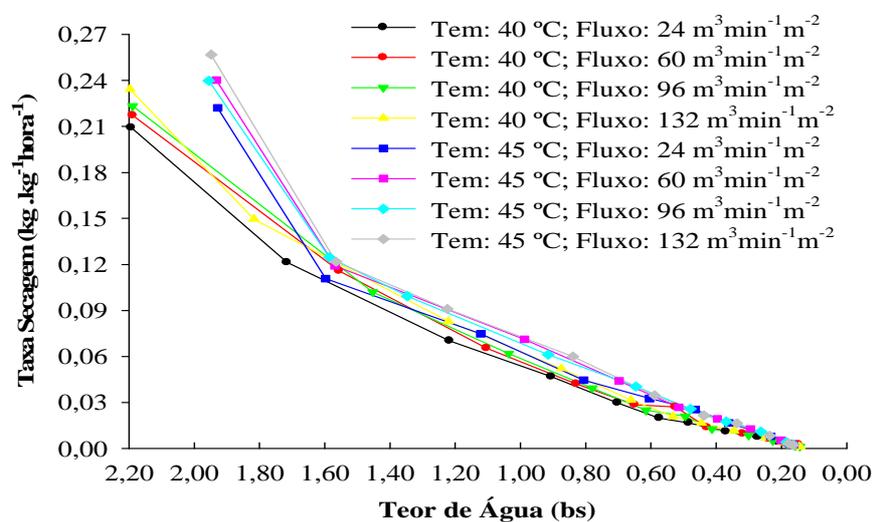


Figura 2 Taxa de secagem em função do teor de água presente nos frutos de café.

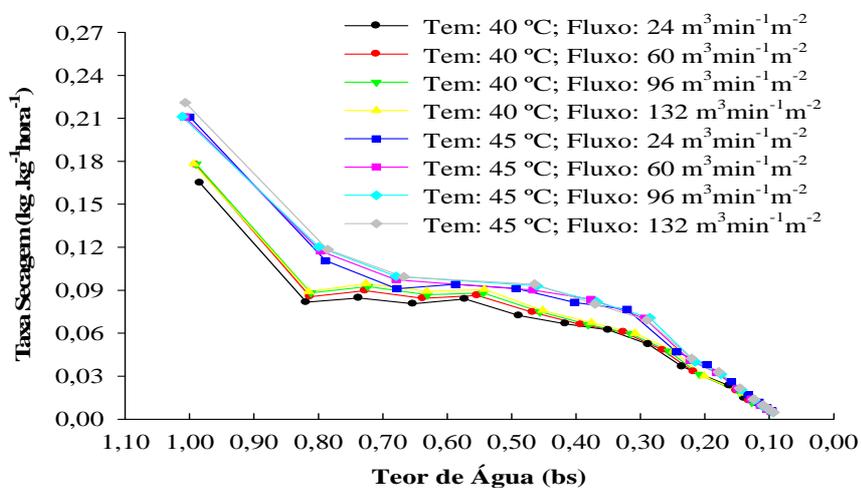


Figura 3 Taxa de secagem em função do teor de água presente no café em pergaminho.

Verifica-se, nas Figuras 2 e 3, que a elevação da temperatura proporciona maiores taxas de secagem para um mesmo teor de água, e essas

diferentes taxas nas diferentes temperaturas são maiores no início da secagem e, à medida que os frutos e o café em pergaminho ficam mais secos, as diferenças diminuem consideravelmente. Já o efeito do fluxo de ar, para o mesmo processamento e temperatura, é mais evidente no início da secagem. Com o decorrer do processo de secagem, a remoção da água do café fica mais difícil em função da ligação mais forte entre a água e os demais constituintes do grão. Logo, as taxas de secagem, para os quatro fluxos de ar e para as duas temperaturas, tendem a se igualar ou ficar mais próximas no final do processo.

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros estatísticos obtidos para os modelos utilizados na descrição da cinética da secagem do café natural e despulpado, os valores dos coeficientes de determinação (R^2), o desvio padrão da estimativa (SE) e o erro médio relativo (P), para os onze modelos empregados para descrever a cinética de secagem do café, com teor de água inicial médio de 2,07 kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs) e 1,00 kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs), para o café natural e o despulpado, respectivamente, quando submetidos às duas temperaturas e para os quatro fluxos de ar utilizados.

Tabela 4 Valores de coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P), obtidos para os modelos utilizados para descrever a cinética de secagem do café natural e despulpado, para diferentes temperaturas e fluxos de ar.

| Café despulpado 40°C | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|---|-------|--------------------|------|-------|--------------------|------|-------|--------------------|------|-------|--------------------|
| Modelo | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | | | | | | | | | | | |
| | 24 | | | 60 | | | 96 | | | 132 | | |
| | SE | P(%) | R ² (%) | SE | P(%) | R ² (%) | SE | P(%) | R ² (%) | SE | P(%) | R ² (%) |
| 6 | 0,03 | 29,57 | 99,47 | 0,04 | 48,03 | 98,67 | 0,04 | 50,66 | 98,74 | 0,03 | 12,10 | 99,48 |
| 7 | 0,04 | 68,18 | 98,32 | 0,04 | 51,16 | 98,59 | 0,04 | 54,14 | 98,65 | 0,04 | 25,31 | 98,58 |
| 8 | 0,02 | 23,36 | 99,71 | 0,08 | 46,47 | 94,04 | 0,09 | 38,27 | 95,03 | 0,02 | 4,57 | 99,79 |
| 9 | 0,04 | 63,22 | 98,46 | 0,04 | 48,03 | 98,67 | 0,04 | 50,67 | 98,74 | 0,04 | 24,00 | 98,66 |
| 10 | 0,02 | 19,61 | 99,68 | 0,02 | 15,29 | 99,69 | 0,02 | 15,94 | 99,70 | 0,02 | 6,61 | 99,74 |
| 11 | 0,04 | 68,18 | 98,32 | 0,04 | 51,16 | 98,59 | 0,04 | 54,14 | 98,65 | 0,04 | 25,31 | 98,58 |

“Tabela 4, conclusão”

| Café despolpado 40°C | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|--------|--------------------|------|-------|--------------------|------|--------|--------------------|------|--------|--------------------|
| Modelo | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | | | | | | | | | | | |
| | 24 | | | 60 | | | 96 | | | 132 | | |
| | SE | P(%) | R ² (%) | SE | P(%) | R ² (%) | SE | P(%) | R ² (%) | SE | P(%) | R ² (%) |
| 12 | 0,03 | 29,01 | 99,33 | 0,03 | 23,33 | 99,35 | 0,03 | 23,93 | 99,41 | 0,03 | 12,97 | 99,31 |
| 13 | 0,04 | 68,18 | 98,32 | 0,04 | 51,15 | 98,59 | 0,04 | 54,15 | 98,65 | 0,04 | 25,32 | 98,58 |
| 14 | 0,03 | 31,43 | 99,40 | 0,02 | 23,88 | 99,44 | 0,04 | 54,14 | 98,65 | 0,03 | 12,72 | 99,41 |
| 15 | 0,02 | 13,98 | 99,72 | 0,02 | 12,53 | 99,64 | 0,02 | 15,84 | 99,65 | 0,02 | 2,73 | 99,69 |
| 16 | 0,01 | 6,78 | 99,87 | 0,01 | 4,43 | 99,85 | 0,01 | 5,71 | 99,87 | 0,01 | 3,21 | 99,84 |
| Café despolpado 45 °C | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0,03 | 37,23 | 99,38 | 0,02 | 23,48 | 99,60 | 0,02 | 30,35 | 99,60 | 0,02 | 38,94 | 99,53 |
| 7 | 0,04 | 76,11 | 98,65 | 0,02 | 29,03 | 99,51 | 0,02 | 37,38 | 99,52 | 0,03 | 83,47 | 98,91 |
| 8 | 0,12 | 128,02 | 90,73 | 0,04 | 56,92 | 98,95 | 0,02 | 36,60 | 99,68 | 0,15 | 205,23 | 84,59 |
| 9 | 0,04 | 72,50 | 98,70 | 0,03 | 56,93 | 98,95 | 0,03 | 72,78 | 98,90 | 0,03 | 79,41 | 98,96 |
| 10 | 0,02 | 29,24 | 99,57 | 0,02 | 21,58 | 99,66 | 0,02 | 26,21 | 99,67 | 0,02 | 32,76 | 99,64 |
| 11 | 0,04 | 76,11 | 98,65 | 0,03 | 61,01 | 98,88 | 0,03 | 78,32 | 98,81 | 0,03 | 83,45 | 98,91 |
| 12 | 0,03 | 38,50 | 99,23 | 0,02 | 24,27 | 99,49 | 0,02 | 30,12 | 99,51 | 0,03 | 41,11 | 99,40 |
| 13 | 0,04 | 76,11 | 98,65 | 0,03 | 61,03 | 98,88 | 0,04 | 78,35 | 98,81 | 0,03 | 83,47 | 98,91 |
| 14 | 0,04 | 76,10 | 98,65 | 0,02 | 27,14 | 99,68 | 0,04 | 78,35 | 98,81 | 0,02 | 32,38 | 99,69 |
| 15 | 0,03 | 33,09 | 99,37 | 0,03 | 42,01 | 99,40 | 0,03 | 56,64 | 99,42 | 0,03 | 61,99 | 99,21 |
| 16 | 0,02 | 7,99 | 99,79 | 0,01 | 12,12 | 99,85 | 0,01 | 16,85 | 99,85 | 0,01 | 12,18 | 99,84 |
| Café natural 40 °C | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0,01 | 2,43 | 99,95 | 0,01 | 4,23 | 99,93 | 0,01 | 2,99 | 99,96 | 0,01 | 3,87 | 99,94 |
| 7 | 0,02 | 18,00 | 99,42 | 0,04 | 34,88 | 97,21 | 0,02 | 19,60 | 99,47 | 0,02 | 23,40 | 99,26 |
| 8 | 0,01 | 1,61 | 99,96 | 0,00 | 2,63 | 99,99 | 0,00 | 2,05 | 100,00 | 0,01 | 3,87 | 99,94 |
| 9 | 0,03 | 24,46 | 98,63 | 0,03 | 25,85 | 98,66 | 0,03 | 26,55 | 98,67 | 0,03 | 29,56 | 98,46 |
| 10 | 0,01 | 2,45 | 99,96 | 0,00 | 1,08 | 99,99 | 0,00 | 2,21 | 99,98 | 0,01 | 2,66 | 99,96 |
| 11 | 0,04 | 32,92 | 97,28 | 0,04 | 34,88 | 97,21 | 0,04 | 34,80 | 97,44 | 0,04 | 38,02 | 97,07 |
| 12 | 0,01 | 4,30 | 99,94 | 0,00 | 4,80 | 99,96 | 0,01 | 5,52 | 99,95 | 0,01 | 6,62 | 99,92 |
| 13 | 0,01 | 4,14 | 99,92 | 0,01 | 3,59 | 99,90 | 0,01 | 3,12 | 99,95 | 0,01 | 3,17 | 99,93 |
| 14 | 0,01 | 3,11 | 99,91 | 0,04 | 34,88 | 97,21 | 0,01 | 4,21 | 99,93 | 0,04 | 38,02 | 97,07 |
| 15 | 0,12 | 87,40 | 78,66 | 0,12 | 98,53 | 76,07 | 0,12 | 101,93 | 76,40 | 0,13 | 114,05 | 72,19 |
| 16 | 0,02 | 11,59 | 99,65 | 0,02 | 11,82 | 99,61 | 0,02 | 13,14 | 99,61 | 0,02 | 16,08 | 99,45 |
| Café natural 45 °C | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0,01 | 1,78 | 99,96 | 0,01 | 2,06 | 99,96 | 0,01 | 2,22 | 99,95 | 0,01 | 2,22 | 99,94 |
| 7 | 0,01 | 2,46 | 99,94 | 0,02 | 12,73 | 99,26 | 0,01 | 3,25 | 99,93 | 0,02 | 17,10 | 99,07 |
| 8 | 0,01 | 1,78 | 99,96 | 0,01 | 2,06 | 99,96 | 0,00 | 1,48 | 99,99 | 0,00 | 0,86 | 100,00 |
| 9 | 0,02 | 11,35 | 99,61 | 0,01 | 8,01 | 99,71 | 0,02 | 12,02 | 99,56 | 0,02 | 12,15 | 99,57 |
| 10 | 0,00 | 1,04 | 99,98 | 0,00 | 1,24 | 99,98 | 0,00 | 1,07 | 99,98 | 0,00 | 0,83 | 99,98 |
| 11 | 0,02 | 15,96 | 99,17 | 0,02 | 12,73 | 99,26 | 0,02 | 17,06 | 99,05 | 0,02 | 17,10 | 99,07 |
| 12 | 0,00 | 2,84 | 99,97 | 0,00 | 1,45 | 99,98 | 0,00 | 2,91 | 99,97 | 0,01 | 3,88 | 99,95 |
| 13 | 0,01 | 1,82 | 99,94 | 0,01 | 3,17 | 99,90 | 0,01 | 2,11 | 99,93 | 0,01 | 2,14 | 99,91 |
| 14 | 0,01 | 2,53 | 99,94 | 0,01 | 2,59 | 99,95 | 0,01 | 3,17 | 99,93 | 0,01 | 4,07 | 99,90 |
| 15 | 0,08 | 45,58 | 91,63 | 0,07 | 36,89 | 93,38 | 0,08 | 46,94 | 91,04 | 0,08 | 47,22 | 90,98 |
| 16 | 0,01 | 3,10 | 99,96 | 0,01 | 2,42 | 99,96 | 0,01 | 3,37 | 99,95 | 0,01 | 2,55 | 99,95 |

Devido à grande diferença existente na cinética de secagem do café processado pela via seca e pela via úmida, a análise dos parâmetros estatísticos foi realizada separadamente para cada tipo de processamento.

A análise de um único parâmetro não constitui uma boa ferramenta para a avaliação de modelos não lineares, sendo necessária uma análise conjunta dos parâmetros: coeficiente de determinação, desvio padrão da estimativa e erro médio relativo. A capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa. No que se refere ao erro médio relativo, valores inferiores a 10% são recomendados (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Para o café despulpado, verifica-se que, com relação aos valores dos coeficientes de determinação (R^2), o modelo de Valcam (16) foi o que apresentou os maiores valores, superiores a 99,83%. Já para o café processado pela via seca, observa-se que todos os modelos empregados, exceto o modelo de Wang e Sing (15), apresentaram coeficiente de determinação (R^2) superior a 97,06, o que, segundo Madamba, Driscoll e Busckle (1996), é um valor considerado aceitável para descrever o fenômeno da secagem.

Quando se considera o critério de erro médio relativo (P) inferior a 10%, para um ajuste aceitável, os resultados obtidos para o café despulpado mostram que apenas o café seco a 40 °C apresentou valores para o erro médio relativo aceitável ($P < 6,78\%$), quando se utilizou o modelo de Valcam. Para a temperatura de 45 °C, nenhum modelo apresentou ajustes satisfatório com relação ao erro médio relativo. Para o café natural, os modelos de dois termos (6), Henderson & Pabis modificado (8), Midilli (10), Page (12) e Thompson (13) apresentaram erros médios relativos inferiores a 10%.

Analisando-se os valores do desvio padrão da estimativa, todos os modelos utilizados apresentaram $SE < 0,05$, exceto os modelos de Henderson & Pabis Modificado (8) e o modelo de Wang e Sing (15).

Na Tabela 5 são descritos os comportamentos (ou tendências) da distribuição de resíduos para os modelos estudados. Verifica-se que apenas o modelo de Valcam (16), para o café despulpado, e o modelo de Midilli (10), para o café natural, apresentaram distribuição aleatória dos resíduos para todas as condições de secagem. 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 (GONELI et al., 2011).

Tabela 5 Tendência de distribuição dos resíduos (A = aleatória; T = tendenciosa) para os onze modelos analisados, durante a secagem mecânica do café natural e despulpado submetidos a diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem.

| Modelo | Tendência de distribuição dos resíduos | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|----|----|-----|------------------|----|----|-----|---------------|----|----|-----|---------------|----|----|-----|
| | Despulpado 40 °C | | | | Despulpado 45 °C | | | | Natural 40 °C | | | | Natural 45 °C | | | |
| | Fluxo de ar ($m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 24 | 60 | 96 | 132 | 24 | 60 | 96 | 132 | 24 | 60 | 96 | 132 | 24 | 60 | 96 | 132 |
| 6 | T | T | T | T | T | T | T | T | A | T | A | T | A | A | T | T |
| 7 | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | A | T | T | T |
| 8 | T | T | T | A | T | T | T | T | T | A | A | T | A | A | A | A |
| 9 | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T |
| 10 | T | T | T | T | T | T | T | T | A | A | A | A | A | A | A | A |
| 11 | T | T | T | T | T | T | T | T | A | T | T | T | T | T | T | T |
| 12 | T | T | T | T | T | T | T | T | A | A | A | T | A | A | A | T |
| 13 | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | A | T | T | T | T | T |
| 14 | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T |
| 15 | A | A | A | A | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T | T |
| 16 | A | A | A | A | A | A | A | A | T | T | T | T | T | T | T | T |

Entre os modelos utilizados neste experimento para descrever o processo de secagem do café despulpado secado a 40°C, o de Valcam (16) foi o que

apresentou os melhores ajustes, após uma análise conjunta dos valores do coeficiente de determinação, erro médio relativo, desvio padrão da estimativa e tendência de distribuição dos resíduos. Para o café natural, o modelo que apresentou um ajuste mais adequado foi o de Midilli (10).

Na Tabela 6 são apresentados os coeficientes do modelo de Valcam, para o café despulpado seco a 40 °C, e os coeficientes do modelo de Midilli para o café natural, ajustados aos dados observados da cinética de secagem em camada fina, nas condições consideradas neste experimento.

Tabela 6 Coeficientes do modelo de Valcam e Midilli ajustados aos dados experimentais de secagem de café despulpado seco a 40 °C e natural em camada fina.

| Modelo | Processamento | Tem (°C) | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | Coeficientes do modelo | | | |
|---------|---------------|-------------|--|------------------------|---------|--------|--------|
| | | | | a | b | c | d |
| Valcam | Despulpado | 40 | 24 | 0,9816 | -0,1461 | 0,0114 | 0,0025 |
| | | | 60 | 0,9819 | -0,1640 | 0,0183 | 0,0019 |
| | | | 96 | 0,9839 | -0,1704 | 0,0203 | 0,0018 |
| | | | 132 | 0,9846 | -0,1697 | 0,0187 | 0,0022 |
| Nenhum | Despulpado | 45 | - | - | - | - | |
| Midilli | Natural | 40 | 24 | 1,0005 | 0,1320 | 0,7737 | 0,0002 |
| | | | 60 | 0,9956 | 0,1380 | 0,7734 | 0,0002 |
| | | | 96 | 1,0026 | 0,1382 | 0,7761 | 0,0002 |
| | | | 132 | 1,0016 | 0,1506 | 0,7634 | 0,0002 |
| | | 45 | 24 | 0,9937 | 0,1148 | 0,8890 | 0,0003 |
| | | | 60 | 0,9917 | 0,1024 | 0,8861 | 0,0001 |
| | | | 96 | 0,9929 | 0,1146 | 0,8815 | 0,0003 |
| | | | 132 | 0,9896 | 0,1167 | 0,8912 | 0,0003 |

Nas Figuras 4 e 5, apresentam-se os comportamentos da razão de umidade observado e estimado, pelo modelo de Valcam, para o café despulpado seco a 40 °C, e pelo modelo de Midilli, para o café natural, durante a secagem em camada fina.

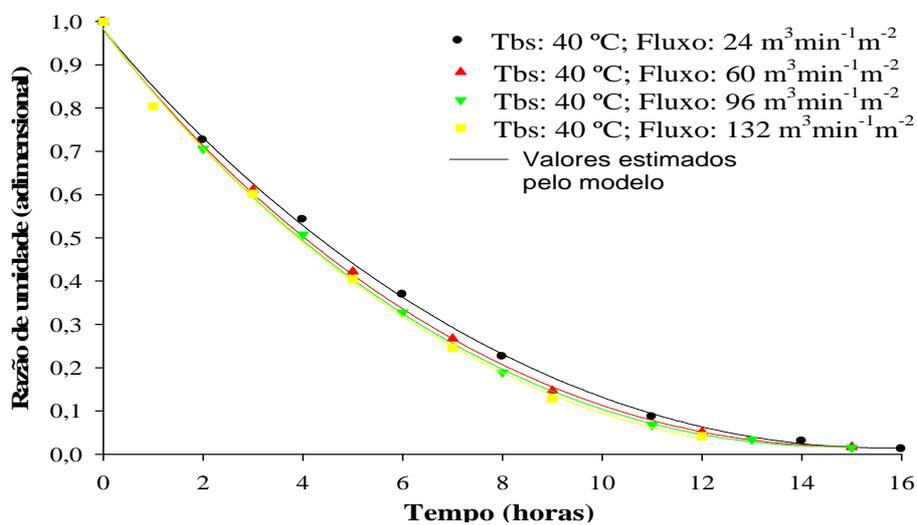


Figura 4 Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Valcam para a secagem do café despulpado seco a 40 °C, em função do tempo.

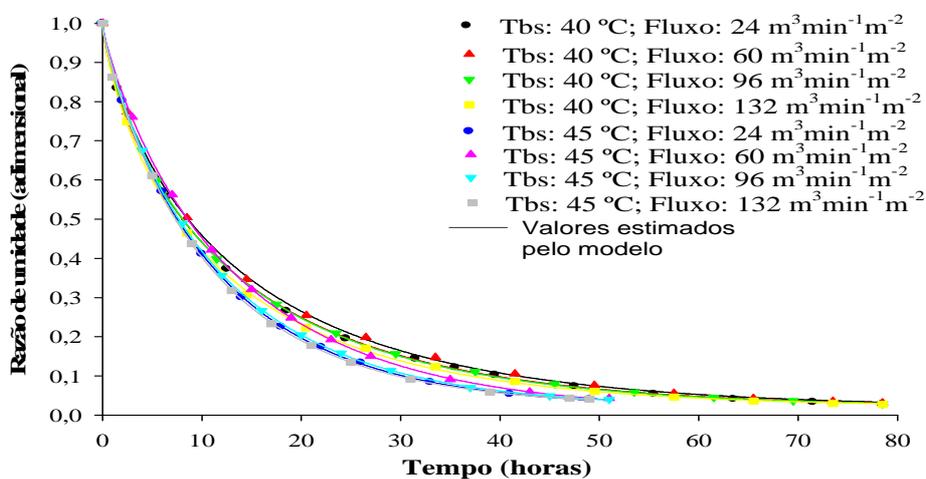


Figura 5 Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a secagem do café natural, em função do tempo.

Observa-se, nas Figuras 4 e 5, a elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os valores estimados pelos modelos, para todas as condições estudadas, o que confirma o ajuste satisfatório desses modelos para descrever a cinética, para cada tipo de processamento, nas condições estudadas.

Na Tabela 7 encontram-se os resultados do desdobramento do efeito do tratamento de secagem para cada temperatura e fluxo de ar utilizado sobre o tempo de secagem do café despulpado.

Tabela 7 Valores médios de tempo de secagem (horas), até o café atingir $0,125 \pm 0,005$ kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs) no grão, para o café despulpado, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem.

| Temperatura (°C) | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | | | |
|---------------------|--|----------|---------|---------|
| | 24 | 60 | 96 | 132 |
| 40 | 13,30aA | 12,84aB | 12,59aC | 12,13aC |
| 45 | 10,65bA | 10,44bAB | 10,10bB | 10,15bB |

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

Pode-se confirmar, pelos dados da Tabela 7, que houve diferenças significativas entre as temperaturas e os fluxos de ar de secagem utilizados, e que os maiores tempos de secagem, independente do fluxo de ar, foram para as temperaturas de 40 °C.

Com relação aos fluxos de ar utilizados, nota-se que, para as duas temperaturas do ar de secagem, o fluxo de 24 m³.min⁻¹.m⁻² apresentou os maiores tempos de secagem. Já para os fluxos de 96 e 132 m³.min⁻¹.m⁻², para as duas temperaturas, não foram encontradas diferenças significativas.

Na Tabela 8 encontram-se os resultados do efeito do tratamento de secagem para cada temperatura e fluxo de ar utilizado sobre o tempo de secagem do café natural.

Tabela 8 Valores médios de tempo de secagem (horas), até o café atingir $0,125 \pm 0,005 \text{ kg de água.kg de matéria seca}^{-1}$ (bs) no grão, para o café natural, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem.

| Temperatura (°C) | Fluxo de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) | | | | Média |
|---------------------|---|----------|----------|---------|---------|
| | 24 | 60 | 96 | 132 | |
| 40 | 73,20 | 71,06 | 67,92 | 66,10 | 69,57 a |
| 45 | 47,93 | 45,84 | 44,08 | 44,46 | 45,58 b |
| Média | 60,57 A | 58,45 AB | 56,00 BC | 55,28 C | |

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

Pode-se confirmar, pelos dados da Tabela 8, que os resultados são semelhantes aos encontrados para o café despulpado (Tabela 7). Os maiores tempos de secagem, independente do fluxo de ar, foram para as temperaturas de 40 °C.

Com relação aos fluxos de ar utilizados, nota-se que, para as duas temperaturas do ar de secagem, o fluxo de $24 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ apresentou os maiores tempos de secagem. Já os fluxos de 96 e $132 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, para as duas temperaturas, não apresentaram diferenças significativas. Com isso, pode-se dizer que, para o intervalo de fluxo de ar utilizado, é recomendado um fluxo de $96 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, para obter uma secagem rápida, independente do processamento e da temperatura do ar de secagem.

4 CONCLUSÕES

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

- os modelos de Valcam e Midilli apresentam os melhores ajustes aos dados experimentais para o café despulpado seco a 40 °C e natural, respectivamente;
- nenhum modelo ajustou-se satisfatoriamente para descrever o processo de secagem do café despulpado seco a 45 °C;
- o aumento da temperatura e do fluxo de ar aumenta a taxa de secagem e, conseqüentemente, reduz o tempo de secagem do café;
- o tempo gasto para a secagem do café, considerando o mesmo processamento e temperatura do ar de secagem, até atingir o teor de água de $0,125 \pm 0,005 \text{ kg de água.kg de matéria seca}^{-1}$ (bs) no grão, utilizando o fluxo de ar de 96 e $132 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, é estatisticamente igual.

REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 384 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 73, n. 1, p. 75-84, Jan. 2006.

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

BORÉM, F. M. Processamento do café. In: _____. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 203-240.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café, safra 2013 segunda estimativa, maio/2013**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 21 jul. 2013.

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

DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, London, v. 41, n. 5, p. 789-795, 2008.

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

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

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

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

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

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

ISQUIERDO, E. P. Drying kinetics and quality of natural coffee. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 53, n. 3, p. 1003-1010, 2013.

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

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

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

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

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, Feb. 2005.

NILNONT, W. et al. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, v. 90, n. 2, p. 341-350, Apr. 2012.

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

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

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

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.

RESENDE, O. et al. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora Pierre*) em terreno de chão batido. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 247-256, 2010.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.

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

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 23, p. 1261-1265, 1980.

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

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of *jatropha* fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agrônômica**, 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 drying kinetics of Jatropha seeds. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 5, n. 1, p. 83-92, Jan./Apr. 2012b.

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

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

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

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 11, p. 668-672, 1978.

ARTIGO 2

Qualidade fisiológica e sensorial do café arábica submetido a diferentes temperaturas e fluxos de ar de secagem

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a correlação entre um grupo de variáveis fisiológicas (condutividade elétrica, lixiviação de potássio e porcentagem de germinação) e um grupo de variáveis de cinética de secagem (tempo e taxa de secagem), bem como verificar a relação entre as variáveis de cinética de secagem e a qualidade sensorial do café, em função do tipo de processamento, da temperatura e do fluxo de ar de secagem. Para a realização deste experimento utilizaram-se frutos de café (*Coffea arabica* L. cv. Bourbon Amarelo) colhidos manualmente, selecionando-se apenas frutos maduros e, posteriormente, separados em água por diferença de densidade. A secagem do café foi realizada em secador mecânico com duas temperaturas (40 e 45 °C) e dois fluxos de ar de secagem (24 e 96 m³.min⁻¹.m⁻²). Após a secagem, foi avaliada a qualidade fisiológica e sensorial. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que: o café processado via seca é mais sensível à secagem mecânica com ar aquecido do que o processado via úmida, apresentando pior desempenho fisiológico; o fluxo de ar não interfere na qualidade fisiológica do café despulpado e natural; a elevação da temperatura de 40 para 45 °C resultou em queda da qualidade fisiológica apenas para o café despulpado e a elevação da taxa de secagem, por meio da elevação do fluxo de ar de secagem, para a temperatura de 40 °C, teve efeito negativo na qualidade sensorial do café despulpado.

Palavras-chave: Cinética de secagem. Processamento. Taxa de secagem.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do café depende de vários fatores, que se estendem desde a escolha da espécie e/ou variedade para o plantio até o preparo para o seu consumo. Dentre esses fatores, o processamento, a secagem, o armazenamento, o beneficiamento e o transporte são fundamentais para a manutenção e a obtenção de um produto final diferenciado.

Entre as diversas etapas da pós-colheita, a secagem é a de maior relevância, tanto do ponto de vista de consumo de energia e formação dos custos de processamento, como do ponto de vista da preservação da qualidade (BORÉM, 2008). Se não for corretamente realizada, a secagem poderá prejudicar a qualidade em decorrência de alterações físicas, químicas e sensoriais indesejáveis. Com isso, permite que componentes químicos, antes compartimentalizados, entrem em contato com enzimas hidrolíticas e oxidativas, afetando as características de cor, sabor e aroma da bebida (BORÉM, 2008; BYTOF et al., 2007; MARQUES et al., 2008).

A análise sensorial é a forma mais utilizada para determinar a qualidade da bebida do café, determinada pelo sabor e o aroma formados durante a torração, a partir de componentes químicos presentes nos grãos crus (BORÉM et al., 2008; FARAH et al., 2006).

Os testes de lixiviação de potássio e condutividade elétrica têm sido bastante utilizados em pesquisas como indicadores consistentes da integridade das membranas celulares (ANGÉLICO et al., 2011; BORÉM et al., 2008; CORADI et al., 2007; ISQUIERDO et al., 2011, 2012; MARQUES et al., 2008; NOBRE et al., 2011; REINATO et al., 2012; RIBEIRO et al., 2011; SAATH et al., 2012; SANTOS; CHALFOUN; PIMENTA, 2009). Os grãos com membranas mal estruturadas lixiviam maior quantidade de solutos quando imersos em água (PRETE, 1992). Em várias pesquisas foi demonstrado que

cafés de pior qualidade apresentam maiores valores de lixiviação de potássio e de condutividade elétrica (BORÉM et al., 2008; MARQUES et al., 2008; SANTOS; CHALFOUN; PIMENTA, 2009).

Apesar da evolução tecnológica da cafeicultura nacional nos últimos anos, as tecnologias de secagem não evoluíram o suficiente para atender ao fluxo de café proveniente, principalmente, da colheita mecanizada. Com isso, muitas vezes, as estruturas de secagem são insuficientes para receber o volume de café colhido diariamente. Diante desse cenário, a solução encontrada por alguns cafeicultores é, para a secagem em terreiros, espalhar o café em camadas mais espessas do que o recomendado. Na secagem mecânica, o que se observa é a utilização de temperaturas de secagem acima do limite tolerado pelo café, com objetivo de acelerar o processo e aumentar a capacidade de secagem. Porém, essas alternativas irão comprometer a qualidade do café, por causar fermentações no terreiro e danos térmicos no caso de secadores.

As tecnologias disponíveis para secagem do café só permitem o aumento da taxa de secagem pelo aumento da temperatura, ou do fluxo de ar. No entanto, temperaturas da massa de café acima de 40 °C causam danos térmicos que depreciam sua qualidade (ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009). Uma alternativa para aumentar a taxa de secagem sem ultrapassar o limite máximo de temperatura tolerável pelo café pode ser o uso de fluxos de ar de secagem muito maiores que os utilizados comercialmente. No entanto, pouco se sabe sobre o efeito da utilização desses fluxos na qualidade do café.

Diante disso, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a correlação entre um grupo de variáveis fisiológicas (condutividade elétrica, lixiviação de potássio e porcentagem de germinação) e um grupo de variáveis de cinética de secagem (tempo e taxa de secagem), bem como verificar a relação entre as variáveis de cinética de secagem e a qualidade sensorial do café, em

função do tipo de processamento, da temperatura e do fluxo de ar de secagem utilizado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Colheita e processamento do café

Para a condução do experimento, utilizaram-se frutos de café (*Coffea arabica* L. cv. Bourbon Amarelo) colhidos manualmente, selecionando-se apenas frutos maduros ou “cereja”, do Sítio São José, localizado no município de Carmo de Minas, Minas Gerais (latitude: 22°07'57" S; longitude: 45°13'27" W; altitude: 1.345 m). Após a colheita, os frutos foram separados, em água, por diferença de densidade, removendo-se os de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados). Em seguida, nova seleção manual foi realizada para a retirada de frutos imaturos e sobremaduros remanescentes. Os frutos maduros e selecionados foram, então, divididos em duas partes: uma parte foi levada diretamente para os secadores, constituindo, assim, a porção de café “natural” (processamento via seca) e a outra parte foi descascada e deixada em tanques para fermentação em água, em condição ambiente, por 20 horas. Após a fermentação, o café foi lavado em água corrente, até a completa retirada da mucilagem remanescente. O café em pergaminho foi, então, levado ao secador, constituindo, assim, a porção café despulpado (processado via úmida). Todos os procedimentos de colheita e processamento foram realizados segundo Borém (2008).

Sistema de secagem

O sistema de secagem foi composto por três secadores de camada fixa (Figura 1). Nesses secadores, o fluxo de ar e a temperatura (T) do ar de secagem foram controlados, com precisão, por meio de um painel eletrônico.



Figura 1 Secadores utilizados para a secagem mecânica do café.

Cada secador é composto por três bandejas removíveis com fundos perfurados, de seção quadrada, com lados e profundidade iguais a 0,3 m. As bandejas ficaram dispostas sobre plenum, para a uniformização do fluxo de ar. Os cafés natural e despulpado foram colocados nessas bandejas com, respectivamente, 5,7 e 2,3 kg, cada amostra, o que correspondeu a uma camada de 0,046 m e 0,106 m de café.

A velocidade do ar de secagem foi monitorada com o uso de um anemômetro de pás. Para todos os tratamentos, a velocidade foi regulada e mantida constante em 0,4 e 1,6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, correspondendo aos fluxos de 24 e 96 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente.

A partir dos resultados obtidos no trabalho apresentado no artigo 1, escolheram-se dois fluxos de ar de secagem para serem utilizados nessa etapa do trabalho. Os escolhidos foram fluxo de 24 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ e de 96 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. O primeiro por ser, na maioria das vezes, o que melhor representa o que é utilizado pelos produtores e o outro por ter sido o fluxo que apresentou o menor tempo de secagem até o café atingir $0,125\pm 0,005$ (bs) no grão, tanto para o café natural como para o despulpado. Vale ressaltar que, a partir dos resultados obtidos no

trabalho relatado no Artigo 1, não foi observada diferença no tempo de secagem, quando se utilizaram os fluxos de 96 e 132 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Portanto, escolheu-se o menor fluxo, que proporcionou o menor tempo de secagem.

Duas temperaturas do ar de secagem foram utilizadas (40 e 45 °C). Seu monitoramento foi realizado por meio de termômetros de mercúrio colocados na massa de café.

Delineamento experimental

O delineamento experimental foi constituído de esquema fatorial 2x2x2, inteiramente casualizado, sendo duas formas de processamento (natural e despulpado), duas temperaturas de secagem (40 e 45 °C) e dois fluxos do ar de secagem (Tabela 1). Para cada tratamento foram realizadas três repetições.

Tabela 1 Tipo de processamento, natural (NAT) e despulpado (CD), temperatura (Tem) e fluxo do ar de secagem.

| Processamento | Tem (°C) | Fluxo ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|----------------------|-----------------|--|
| NAT | 40 | 24 |
| | | 96 |
| | 45 | 24 |
| | | 96 |
| CD | 40 | 24 |
| | | 96 |
| | 45 | 24 |
| | | 96 |

Descrição do processo de secagem

O teor de água médio do café no início da secagem foi de 2,18 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ e 0,87 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (bs), para o café natural e o despulpado, respectivamente. A secagem foi contínua até o café atingir $0,145 \pm 0,005$ (bs), no fruto e $0,125 \pm 0,005$ (bs), no café em pergaminho, o que correspondeu a um teor de água de

0,125±0,005 (bs), para o café beneficiado. As bandejas contendo as amostras foram retiradas do secador e pesadas, a cada hora, em balança analítica com resolução de 0,01 g, até o fim da secagem. Para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre as bandejas, fez-se um rodízio na posição das bandejas a cada pesagem.

O teor de água dos frutos de café e do café em pergaminho, no início e no fim da secagem, foi determinado utilizando-se o método padrão de estufa, 105±3 °C, durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Já o teor de água do café seco beneficiado foi determinado pelo método padrão ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2003). Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos e do café em pergaminho, o acompanhamento da secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa), até atingir o teor de água desejado no café, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g, de acordo com a equação a seguir.

$$U_t = \frac{M_{a_i} - (M_{t_i} - M_{t_t})}{M_{m_s}} \quad (1)$$

em que

U_t : teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

M_{a_i} : massa de água inicial (kg);

M_{t_i} : massa total inicial (kg);

M_{t_t} : massa total no tempo t (kg);

M_{m_s} : massa de matéria seca (kg).

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

$$\text{Tx. Sec.} = \frac{U_{\text{ant}} - U_{\text{at}}}{\Delta t} \quad (2)$$

em que

Tx. Sec.: taxa de secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹.h⁻¹);

U_{ant}: teor de água no tempo anterior (g de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

U_{at}: teor de água atual (g de água.kg matéria seca⁻¹ (bs));

Δt: intervalo de tempo entre as pesagens (h).

Armazenamento e beneficiamento das amostras

Após a secagem, as amostras foram embaladas em sacos de papel kraft pardo unifolhado, que foram revestidos com sacos plásticos de polietileno transparentes e identificados. Em seguida, as amostras foram armazenadas em câmara fria com temperatura controlada a 10 °C e umidade relativa de 60%, por um período de 30 dias.

Posteriormente, o café foi beneficiado separando-se os grãos quanto à forma e ao tamanho. Foram utilizados somente os grãos chatos das peneiras 16 a 18/64 de polegada, eliminando-se os grãos chatos retidos na peneira 19/64 de polegada e os grãos ovais ou “mocas” retidos na peneira com crivo oblongo de 11/64 x 3/4 de polegada. Na sequência, todos os defeitos foram retirados manualmente, visando à uniformização da matéria-prima, que foi utilizada para posteriores análises fisiológicas e sensorial.

Análise sensorial

A análise sensorial foi realizada por três juízes certificados de cafés especiais (SCAA *certified cupping judges*).

Foi utilizado o protocolo de análise sensorial da Associação Americana de Cafés Especiais (SCAA), 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 2 pontos para cada xícara que apresentar normalidade quanto à uniformidade, à doçura e à xícara limpa, avaliando-se 5 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 ± 1 ponto, conforme o sistema de classificação de cor, por meio de discos padronizados (SCAA/*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 8 horas e máxima de 24 horas da degustação.

Em cada avaliação sensorial foram degustadas cinco xícaras de café representativas de cada amostra, realizando-se uma sessão de análise sensorial para cada repetição, totalizando três repetições para cada tratamento.

Análises fisiológicas

Teste de germinação

O teste de germinação foi realizado com quatro subamostras de 50 sementes, distribuídas em papel de germinação umedecido com quantidade de água equivalente a duas vezes e meia a massa do substrato seco, e colocadas para germinar à temperatura de 30 °C. As avaliações foram realizadas aos trinta dias após a semeadura, segundo as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), e os resultados expressos em porcentagem.

Condutividade elétrica

A condutividade elétrica dos grãos crus foi determinada pela metodologia proposta por Krzyzanowski, França Neto e Henning (1991). Foram utilizadas duas repetições de 50 grãos de cada amostra, as quais foram pesadas com precisão de 0,001g e imersas em 75 mL de água destilada, no interior de copos plásticos de 200 mL de capacidade. Em seguida, esses recipientes foram levados à BOD com ventilação forçada regulada para 25 °C, por cinco horas, procedendo-se à leitura da condutividade elétrica da água de embebição em aparelho BEL W12D. Com as leituras obtidas foi calculada a condutividade elétrica pela equação 3, expressando-se o resultado em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de grãos.

$$CE = \frac{\text{Leitura} (\mu\text{S}/\text{cm})}{\text{Peso} (\text{g})} \quad (3)$$

Lixiviação de potássio

A lixiviação de íons de potássio foi realizada nos grãos crus, segundo metodologia proposta por Prete (1992). Após a leitura da condutividade elétrica, as soluções foram submetidas à determinação da quantidade de potássio

lixiviado. A leitura foi realizada em fotômetro de chama Digimed NK-2002. Com os dados obtidos, foi calculada a quantidade de potássio lixiviada de acordo com a equação 4, expressando-se o resultado em ppm.

$$LK = \frac{\text{Leitura} \times \text{Diluição} \times 1,56}{\text{Peso(g)}} \quad (4)$$

Análise estatística

Os resultados obtidos das análises fisiológicas e os valores das taxas e tempos de secagem do café foram submetidos à análise de correlação canônica utilizando-se o software estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013). Já a análise sensorial foi correlacionada com as variáveis de cinética de secagem por matrizes de correlação, utilizando-se o software estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante do grande volume de informações e da complexidade do fenômeno estudado, optou-se, inicialmente, por apresentar os resultados obtidos para, em seguida, discuti-los, a fim de facilitar a compreensão.

Na Tabela 2 são apresentados os tempos médios e as taxas médias de secagem até o café atingir meia-seca (MS) e a secagem completa. São mostrados também os teores de água inicial, até meia-seca e final, em função do tipo de processamento, temperatura e fluxo de ar de secagem.

Tabela 2 Tempos e taxas (Tx) de secagens médias até meia-seca (MS) e até o final da secagem (Final), teor de água inicial, na meia-seca e no final da secagem, em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despulpado (CD), da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem.

| Proc. | Tem (°C) | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | Tempo de secagem (h) | | Teor de água (bs) | | | Tx (g.kg ⁻¹ .h ⁻¹) | |
|-------|----------|---|----------------------|-------|-------------------|------|-------|---|-------|
| | | | MS | Final | Inicial | MS | Final | MS | Média |
| NAT | 40 | 24 | 28,25 | 87,65 | 2,21 | 0,50 | 0,145 | 72,9 | 37,3 |
| | | 96 | 25,55 | 82,63 | 2,18 | 0,50 | 0,145 | 79,5 | 39,3 |
| | 45 | 24 | 20,58 | 56,18 | 2,19 | 0,50 | 0,145 | 96,9 | 46,1 |
| | | 96 | 16,68 | 49,81 | 2,14 | 0,50 | 0,145 | 117,9 | 51,4 |
| CD | 40 | 24 | 9,46 | 18,75 | 0,86 | 0,33 | 0,125 | 56,4 | 42,4 |
| | | 96 | 7,09 | 14,70 | 0,85 | 0,33 | 0,125 | 73,8 | 49,8 |
| | 45 | 24 | 5,15 | 10,60 | 0,89 | 0,33 | 0,125 | 109,5 | 72,4 |
| | | 96 | 4,62 | 9,32 | 0,88 | 0,33 | 0,125 | 117,1 | 82,0 |

Considerou-se meia-seca o teor de água de $0,50 \pm 0,005$ e $0,33 \pm 0,005$ kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs), para o café natural e o despulpado, respectivamente. Para a secagem completa, o teor de água de $0,145 \pm 0,005$ kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs), para o café natural e $0,125 \pm 0,005$ kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs), para o café em pergaminho.

Na Tabela 2 verifica-se que, para o fluxo de $24 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, o aumento da temperatura (de 40 para 45 °C) proporcionou uma redução de 36% (87,65-

56,18 horas) e 43% (18,75-10,60 horas) no tempo de secagem para o café natural e despulpado, respectivamente. Aumentando-se o fluxo de ar de 24 para $96 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, na secagem do café natural, observou-se redução de 6% (87,65-82,63 horas) e 11% (56,18-49,81 horas) no tempo de secagem, para as temperaturas de 40 °C e 45 °C. A mesma elevação nos valores do fluxo de ar, para o café despulpado, proporcionou redução de 22% (18,75-14,70 horas) e 12% (10,60-9,32 horas), para as temperaturas de 40 °C e 45 °C.

O aumento da temperatura do ar resulta em maior diferença entre a pressão de vapor do ar de secagem e a do produto, fazendo com que a água seja removida com mais facilidade e rapidez (SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012). Além disso, na literatura há relatos de outras causas para a redução do tempo de secagem com a elevação da temperatura. O aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente a resistência do fluido ao escoamento. A diminuição da viscosidade facilita a difusão das moléculas de água nos capilares do produto, além de proporcionar aumento no nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para elevação da taxa de secagem (CORRÊA et al., 2010).

Na Figura 2 são apresentadas as taxas de secagem em função do teor de água nos frutos de café natural e do café em pergaminho (despulpado) submetidos à secagem completa em secador.

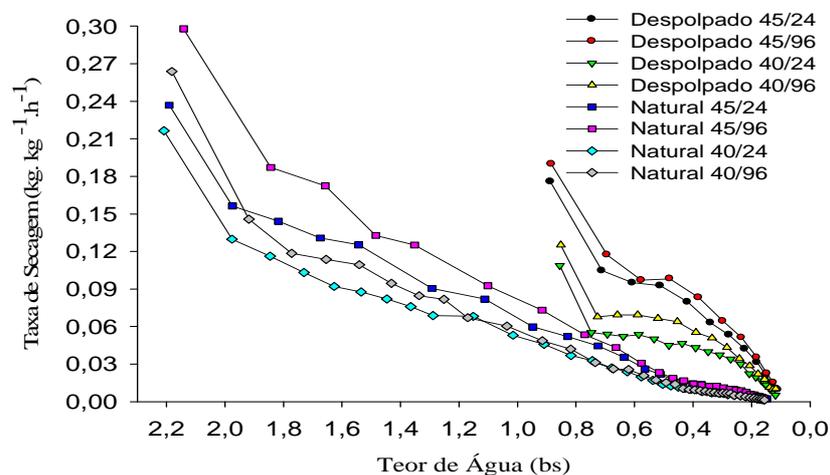


Figura 2 Taxa de secagem em função do teor de água presente no café.

Verifica-se que o café despoldado apresentou maiores taxas de secagem que o natural, considerando o mesmo teor de água. Observa-se, ainda, que, em média, para o mesmo processamento, a elevação da temperatura resultou em maiores taxas de secagem para o mesmo teor de água. Maiores taxas de secagem foram observadas no início da secagem e, à medida que o café natural e em pergaminho ficaram mais secos, as diferenças nos valores da taxa de secagem diminuem consideravelmente. O efeito do fluxo de ar, para o mesmo processamento e temperatura, é mais evidente no início da secagem. Com o decorrer do processo de secagem, a remoção da água do café fica mais difícil em função da ligação mais forte entre a água e os demais constituintes do grão. Logo, as taxas de secagem, para os dois fluxos de ar e para as duas temperaturas, tendem a se igualar ou ficar mais próximas no final do processo, para o mesmo processamento. Esses resultados refletem o que a literatura descreve para a teoria geral de secagem de produtos agrícolas (BORÉM, 2008; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; PABIS; JAYAS; CENKOWSKI, 1998; SILVA, 2008).

O fenômeno de migração de água do interior de grãos não é totalmente conhecido. Ainda assim, numerosos mecanismos térmicos e físicos têm sido propostos para descrever o transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Porém, teorias mais recentes preconizam que, em determinada fase da secagem, o movimento da água seja, basicamente, determinado pela difusão de líquido (BORÉM et al., 2008). A difusão de líquido será facilitada tanto pelo aumento da temperatura como pela remoção de barreiras físicas, como ocorre no despolpamento do café comparativamente à secagem do café natural. O efeito do fluxo de ar sobre a taxa de secagem é mais evidente quando o produto ainda tem elevados teores de água, o que também concorda com a teoria geral da secagem.

Na Tabela 3, encontram-se os valores médios obtidos para análises fisiológicas, condutividade elétrica, lixiviação de potássio e porcentagem de germinação, bem como para a análise sensorial e a taxa de secagem média, em função das variáveis estudadas.

Tabela 3 Taxa de secagem média (TxM), condutividade elétrica (CE), lixiviação de potássio (LK), porcentagem de germinação e análise sensorial, em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despolpado (CD), da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem.

| Proc. | Tem (°C) | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | TxM (g.kg ⁻¹ .h ⁻¹) | CE (μS.g ⁻¹) | LK (ppm) | Porcentagem de germinação (%) | Sensorial |
|-------|----------|---|--|--------------------------|----------|-------------------------------|-----------|
| NAT | 40 | 24 | 37,3 | 13,34 | 32,83 | 4,83 | 82,50 |
| | | 96 | 39,3 | 12,65 | 31,63 | 4,00 | 80,75 |
| | 45 | 24 | 46,1 | 13,60 | 33,18 | 0,00 | 81,67 |
| | | 96 | 51,4 | 12,94 | 31,67 | 0,00 | 81,33 |
| CD | 40 | 24 | 42,4 | 3,81 | 8,29 | 87,67 | 83,25 |
| | | 96 | 49,8 | 3,24 | 7,11 | 84,67 | 81,50 |
| | 45 | 24 | 72,4 | 3,26 | 6,20 | 9,00 | 81,92 |
| | | 96 | 82,0 | 3,19 | 6,18 | 11,67 | 81,83 |

Com o propósito de encontrar combinações lineares que preservassem a relação de dependência entre as variáveis fisiológicas (condutividade elétrica,

lixiviação de potássio e porcentagem de germinação) e as variáveis de cinéticas de secagem (tempos e taxas de secagem até meia-seca e até a secagem completa), utilizou-se a técnica de análise de correlação canônica.

Para validar a análise e justificar a escolha dos pares dessas variáveis fisiológicas e de cinética, os resultados do teste de Bartlett são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Teste de Bartlett para verificação da existência de correlação entre os dois conjuntos de dados representados pelas variáveis fisiológicas e de cinéticas de secagem.

| Pares de variáveis canônicas | Correlação canônica ρ | Estatística qui-quadrado | valor-p |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1 | 0,9965 | 65,057 | $<2,2.10^{-16}$ |
| 2 | 0,9561 | 17,302 | $<2,69.10^{-9}$ |
| 3 | 0,4756 | - | - |

Os resultados obtidos (Tabela 4) evidenciam que, de fato, há forte correlação conjunta ($\rho < 0,05$) entre as variáveis de cinética de secagem e as variáveis fisiológicas, sendo esta representada pelo primeiro par de variáveis canônicas (U_1 e V_1), podendo, ainda, ser representada até o segundo par de variáveis canônicas ($\rho < 0,05$). Contudo, dada a maior correlação observada no primeiro par de variáveis canônicas (0,996), os componentes obtidos são descritos nas equações 5 e 6.

$$U_1 = -0,0057 \times \%Germ + 0,15741 \times CE + 0,0051 \times LK \quad (5)$$

$$V_1 = -0,0336 \times TpT + 0,2119 \times TpMS - 16,841 \times TxT + 28,849 \times TxMS \quad (6)$$

em que

% Germ: porcentagem de germinação (%);

CE: condutividade elétrica ($\mu S.g^{-1}$);

LK: lixiviação de potássio (ppm);
 TpT: tempo de secagem até o final da secagem (h);
 TpMS: tempo de secagem até meia-seca (h);
 TxT: taxa de secagem média até o final da secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹.h⁻¹);
 TxMS: taxa de secagem média até meia-seca (g de água.kg de matéria seca⁻¹.h⁻¹).

A correlação das variáveis originais de cada grupo com os escores U_1 e V_1 das variáveis canônicas, obtidos por meio das equações 5 e 6, estão descritos nas Tabelas 5 e 6.

Tabela5 Correlações das variáveis fisiológicas com as variáveis canônicas.

| Variáveis | Pares de variáveis canônicas | | |
|-----------|------------------------------|--------|--------|
| | U_1 | U_2 | U_3 |
| %Germ | -0,745 | -0,666 | 0,024 |
| CE | 0,986 | -0,161 | 0,008 |
| LK | 0,983 | -0,180 | -0,029 |

%Germ = porcentagem de germinação, CE = condutividade elétrica, LK = lixiviação de potássio, U_1 = primeiro par de variáveis canônicas, U_2 = segundo par de variáveis canônicas, U_3 = terceiro par de variáveis canônicas.

A partir dos resultados descritos na Tabela 5 é possível observar que a primeira variável canônica U_1 , a variável condutividade elétrica (CE) e lixiviação de potássio (LK) apresentaram forte correlação (0,986 e 0,983). Sugere-se, portanto, que U_1 seja denominada CE/LK.

Por outro lado, as variáveis que apresentam maior correlação com a primeira variável canônica V_1 (Tabela 6), para as variáveis de cinética, foram o tempo de secagem total (TpT) e o tempo de secagem até meia-seca (TpMS) com correlações de 0,894 e 0,891, respectivamente. A variável canônica V_1 foi, então, nomeada TpT/TpMS.

Tabela 6 Correlações das variáveis de cinética com as variáveis canônicas.

| Variáveis | Pares de variáveis canônicas | | |
|-----------|------------------------------|----------------|----------------|
| | V ₁ | V ₂ | V ₃ |
| TpT | 0,894 | -0,232 | -0,268 |
| TpMS | 0,891 | -0,293 | -0,185 |
| TxT | -0,493 | 0,847 | 0,122 |
| TxMS | 0,116 | 0,841 | 0,164 |

TpT = tempo de secagem total, TpMS = tempo de secagem até meia-seca, TxT = taxa de secagem média até o final da secagem, TxMS = taxa de secagem média até meia-seca.

Nas Figuras 3 e 4, são apresentados os resultados em função do tipo de processamento, temperatura e fluxo de ar de secagem.

Observa-se, na Figura 3, que foi possível discriminar dois grupos (I e II), em função do tipo de processamento. O grupo I é formado pelos cafés naturais e o grupo II, pelos cafés despulpados. Esses agrupamentos reforçam os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3, em que, para os cafés naturais, foram encontrados maiores tempos de secagem, valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio. A partir desses resultados, pode-se inferir que os cafés naturais apresentam-se mais sensíveis, fisiologicamente, aos efeitos da secagem. Uma das possíveis explicações para isso está no fato de os cafés processados pela via seca (natural) ficarem expostos ao ar de secagem por períodos mais longos, expondo o endosperma e o embrião a danos térmicos mais severos e contribuindo para maior perda da integridade das membranas celulares (SAATH et al., 2012; TAVEIRA et al., 2012).

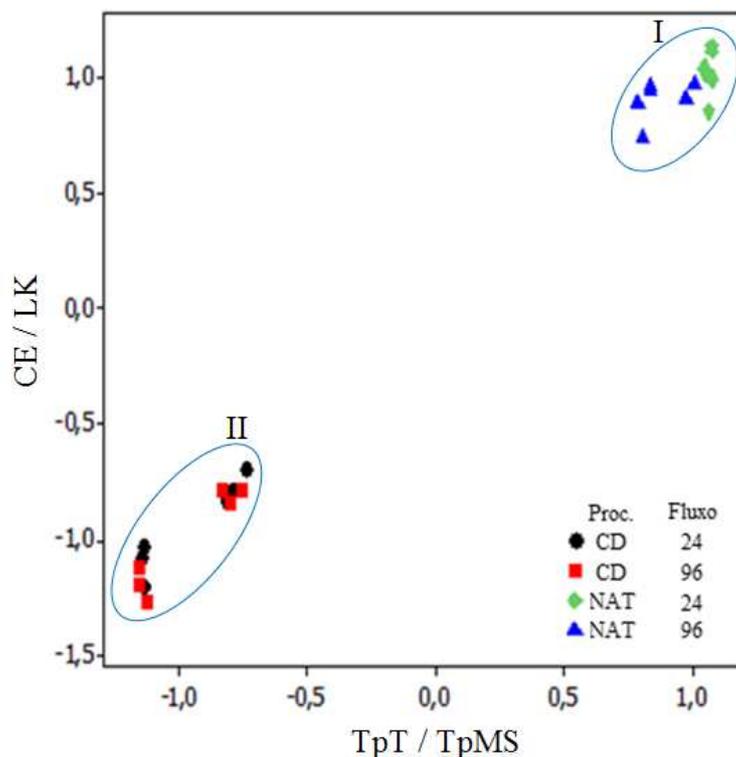


Figura 3 Escores das variáveis canônicas identificadas pelo tipo de processamento e fluxo de ar de secagem.

Analisando-se o efeito da utilização dos diferentes fluxos de ar de secagem (24 e 96 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) dentro do mesmo processamento, verifica-se (Figura 3) que os valores encontrados para as análises fisiológicas (CE e LK) e para os tempos de secagem (TpT e TpMS) foram similares, não sendo possível discriminar grupos em função desta variável, apesar de apresentarem numericamente tempos de secagem menores quando se utilizou o maior fluxo de ar (Tabela 2).

Na Figura 4 é possível observar a separação dos cafés despulpados em dois novos grupos, II e III. Essa discriminação deve-se às respostas distintas em relação às análises fisiológicas (CE e LK) e aos tempos de secagem (TpT e

TpMS) do café despulpado, quando submetido à secagem com temperaturas de 40 e 45 °C. A formação desses dois grupos mostra que, independente do fluxo de ar utilizado, cafés despulpados secos com temperatura de 45 °C apresentam maiores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, combinado com menor tempo de secagem, se comparados com o café despulpado e seco a 40 °C (Tabela 2 e 3).

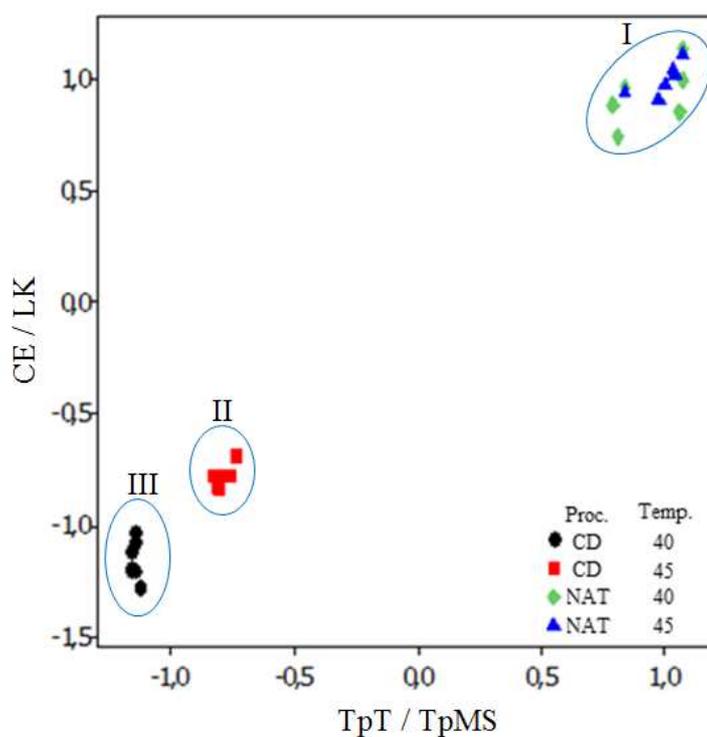


Figura 4 Escores das variáveis canônicas identificadas pelo tipo de processamento e temperatura do ar de secagem.

Diante disso, pode-se dizer que, independente do fluxo de ar, a elevação da temperatura (40-45 °C) reduz o tempo de secagem do café despulpado, mas com efeito negativo na qualidade fisiológica. Já para os cafés naturais, não foi

possível identificar diferenças na qualidade fisiológica (condutividade elétrica e lixiviação de potássio) e nos tempos de secagem (até meia-seca e até a secagem completa), para as temperaturas e os fluxos de ar de secagem utilizados.

A relação entre as variáveis de cinética de secagem com a qualidade sensorial do café, para os dois fluxos estudados (24 e 96 m³.min⁻¹.m⁻²), foi analisada calculando-se os coeficientes da matriz de correlação em função do processamento (natural e despulpado) e da temperatura do ar de secagem (40 e 45 °C). Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 Valores dos coeficientes de correlação entre a análise sensorial e as variáveis de cinética de secagem (tempos e taxas de secagem até a meia-seca e até o final da secagem), para os fluxos de 24 e 96 m³.min⁻¹.m⁻², em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despulpado (CD) e da temperatura do ar de secagem (Tem).

| | Proc. | Tem (°C) | Tempo de secagem | | Taxa de secagem | |
|----------------------|-------|-------------|------------------|-----------|-----------------|-----------|
| | | | Final | Meia-seca | Final | Meia-seca |
| Análise Sensorial | NAT | 40 | 0,278 | 0,453 | -0,412 | -0,448 |
| | | 45 | 0,274 | 0,263 | -0,146 | -0,330 |
| | CD | 40 | 0,834 | 0,815 | -0,835 | -0,795 |
| | | 45 | 0,335 | 0,231 | -0,247 | 0,028 |

Os coeficientes de correlação encontrados na Tabela 7 medem o grau de correlação entre duas variáveis. Estes podem assumir valores entre -1 e 1. Se o coeficiente for próximo a 1, significa alta correlação positiva entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra também aumenta. Se o valor for próximo a zero, indica fraca correlação. No entanto, se o valor for próximo a -1, entende-se que as variáveis têm alta correlação negativa, ou seja, se uma cresce, a outra decresce.

Assim, pode-se afirmar que, dentro de cada nível de temperatura do ar utilizado para a secagem do café natural (40 e 45 °C), não foram encontradas correlações entre as variáveis de cinética de secagem e a qualidade sensorial

(Tabela 7). Ou seja, as diferenças nos tempos e nas taxas de secagem em função do fluxo de ar de secagem (24 ou $96 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) não interferem na qualidade sensorial do café natural, quando seco à temperatura de 40 ou $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Esses resultados estão de acordo com os de Isquierdo et al. (2013) que, estudando o efeito da taxa de secagem em função da utilização de ar de secagem com diferentes umidades relativas, observaram que, para cafés naturais secos a temperaturas de 40 e $45 \text{ }^\circ\text{C}$, o aumento da taxa de secagem provocado pela redução da umidade relativa do ar não influenciou a qualidade sensorial. No entanto, os autores não estudaram o efeito da taxa de secagem para cafés processados pela via úmida.

Neste trabalho, observou-se que a taxa de secagem influencia a qualidade sensorial dos cafés despulpados, entretanto, esse efeito depende da temperatura do ar de secagem.

Para cafés despulpados secos a $45 \text{ }^\circ\text{C}$, os resultados foram semelhantes àqueles observados para os cafés naturais, ou seja, não houve efeito da taxa de secagem na qualidade sensorial do café. Para essa temperatura, a redução da qualidade ocorre em função de danos térmicos, tornando o efeito da taxa de secagem pouco evidente.

Para os cafés despulpados secos à temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, encontraram-se alta correlação positiva entre o tempo de secagem e a nota sensorial, e alta correlação negativa entre a taxa de secagem e a nota sensorial. Assim, pode-se afirmar que a elevação do fluxo de ar de secagem de 24 - $96 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ interfere negativamente na qualidade sensorial de cafés despulpados secos a $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

4 CONCLUSÕES

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

- o café processado via seca é mais sensível à secagem mecânica com ar aquecido do que o processado via úmida, apresentando pior desempenho fisiológico;
- o fluxo de ar não interfere na qualidade fisiológica do café despolpado e natural;
- a elevação da temperatura de 40 para 45 °C resulta em queda da qualidade fisiológica para o café despolpado;
- a elevação da taxa de secagem, por meio da elevação do fluxo de ar de secagem, para a temperatura de 40 °C tem correlação negativa com a qualidade sensorial do café despolpado.

REFERÊNCIAS

- ANGÉLICO, C. L. et al. Diferentes estádios de maturação e tempos de ensacamento sobre a qualidade do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 8-19, jan./abr. 2011.
- BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. v. 1, 631 p.
- BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café natural e despolpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1605-1615, set./out. 2008.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: V. N. Reinhold, 1992. 450 p.
- BYTOF, G. et al. Transient occurrence of seed germination processes during coffee postharvest treatment. **Annals of Botany**, Rockville, v. 100, n. 1, p. 61-66, July 2007.
- CORADI, P. C. et al. Effect of drying and storage conditions on the quality of natural and washed coffee. **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 38-47, Jan./June 2007.
- 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.
- FARAH, A. et al. Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. **Food Chemistry**, Oxford, v. 98, n. 2, p. 373-380, 2006.

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

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

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.

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

KRZYZANOWSKY, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. Relatos dos testes de vigor disponíveis as grandes culturas. **Informativo ABRATES**, Brasília, v. 1, n. 2, p. 15-50, mar. 1991.

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

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.

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.

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

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. Drying systems. In: _____. **Grain drying: theory and practice**. New York: J. Wiley, 1998. p. 262-299.

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

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 26 ago. 2013.

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.

RIBEIRO, F. C. et al. Storage of green coffee in hermetic packing injected with CO₂. **Journal of Stored Products Research**, London, v. 47, n. 4, p. 341-348, 2011.

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.

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.

SILVA, J. S. Secagem e secadores. In: _____. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 109-146.

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.

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. 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. 1511-1517, out. 2012.

ARTIGO 3

Efeito do fluxo de ar de secagem na qualidade sensorial e no conteúdo de açúcares do café arábica

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as alterações na qualidade sensorial e nos teores de sacarose, glicose, frutose, rafinose e maltose, tanto para o café natural como para o despulpado, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem, bem como correlacionar o teor destes constituintes químicos com a qualidade sensorial do café. Para a realização deste experimento, utilizaram-se frutos de café (*Coffea arabica* L. cv. Bourbon Amarelo) colhidos manualmente, selecionando apenas frutos maduros e, posteriormente, submetidos à separação hidráulica. Para a secagem do café, utilizaram-se ar aquecido a duas temperaturas (40 e 45 °C) e dois fluxos de ar de secagem (24 e 96 m³.min⁻¹.m⁻²). Após a secagem, os teores de sacarose, glicose, frutose, rafinose e maltose foram quantificados utilizando-se cromatografia líquida de alta precisão. Conclui-se que o conteúdo de açúcares não é influenciado pela temperatura e pelo fluxo de ar de secagem; o teor de sacarose, rafinose, maltose, glicose e frutose não apresenta relação com a qualidade sensorial; cafés naturais apresentam maiores teores de sacarose, glicose, frutose e maltose e cafés secos à temperatura de 40 °C e fluxos de 24 m³min⁻¹m⁻² apresentam melhor qualidade sensorial.

Palavras-chave: Composição química. Taxa de secagem. Processamento.

1 INTRODUÇÃO

Além dos fatores genéticos, ambientais e dos tratos culturais utilizados na condução e no manejo da lavoura cafeeira, diferenças no sabor e no aroma dos cafés são atribuídas a diversas alterações físico-químicas, fisiológicas e bioquímicas que ocorrem nos grãos ou nas sementes, durante o processamento e a secagem.

Diversas pesquisas foram realizadas na tentativa de relacionar os componentes físico-químicos do grão e a qualidade do café, e assim auxiliar a classificação sensorial (BERTRAND et al., 2008; FARAH et al., 2006; LOPES, 2000; MALTA et al., 2003; PEREIRA, 1997; SILVA et al., 2005; VILLELA, 2002).

O conteúdo de carboidratos, cuja composição geral é $C_x(H_2O)_y$ (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010), presente nos grãos crus de café é evidente e constitui metade do seu peso seco. Carboidratos de baixo e alto peso molecular estão presentes nos grãos crus e ambos participam de várias reações químicas associadas com o processo de torra (BRADBURY, 2001), como a reação de Maillard e/ou caramelização, que é uma das responsáveis pela formação da cor, do sabor e do aroma peculiares da bebida do café (FARAH et al., 2006).

Os açúcares de baixo peso molecular estão presentes no café grão crus, contribuindo para a doçura da bebida, que é considerado um dos atributos mais desejáveis nos cafés especiais, além de participar de reações importantes (CORADI et al., 2007; MARQUES et al., 2008), podendo servir de padrão na avaliação da qualidade, segundo a Organização Internacional do Café - OIC (1991). Dentre esses açúcares, destaca-se a sacarose, por estar presente em maior quantidade, podendo variar de 1,9% a 10% na matéria seca (KNOPP; BYTOF; SELMAR, 2006; LIMA, 2005; LIMA et al., 2010; MENDONÇA et al., 2007;

VILAS BOAS et al., 2001). Figueiredo (2013), estudando a influência dos fatores genéticos e ambientais sobre a qualidade de cafés especiais, verificou que o conteúdo de sacarose foi um bom indicador de qualidade de cafés especiais. Cafés com qualidade superior apresentaram maiores teores de sacarose.

Além da sacarose, outros açúcares, como glicose, maltose, frutose e rafinose, também são de extrema importância para a qualidade da bebida do café, pois, assim como a sacarose, lhe proporcionam sabores e aromas diferenciados (JOET et al., 2010).

Vários trabalhos comprovam que, em grãos crus de café, o conteúdo de glicose, frutose e aminoácidos livres (ácido γ -amino butírico) é variável, dependendo da forma de processamento (KLEINWÄCHTER; SELMAR, 2010; LELOUP et al., 2004; SELMAR et al., 2004).

Apesar da evolução tecnológica da cafeicultura nacional nos últimos anos, as tecnologias de secagem não evoluíram o suficiente para atender ao fluxo de café proveniente, principalmente, da colheita mecanizada. Com isso, muitas vezes, as estruturas de secagem são insuficientes para receber o volume de café colhido diariamente. Diante desse cenário, a solução encontrada por alguns cafeicultores é, para a secagem em terreiros, espalhar o café em camadas mais espessas do que o recomendado. Na secagem mecânica, o que se observa é a utilização de temperaturas de secagem acima do limite tolerado pelo café, com objetivo de acelerar o processo e aumentar a capacidade de secagem. Porém, essas alternativas comprometerão a qualidade do café, por causarem fermentações no terreiro e danos térmicos no caso de secadores.

As tecnologias disponíveis para secagem do café só permitem o aumento da taxa de secagem pelo aumento da temperatura, ou do fluxo de ar. No entanto, temperaturas da massa de café acima de 40 °C causam danos térmicos que depreciam a qualidade (ISQUIERDO et al., 2013; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009). Uma alternativa para aumentar a taxa de secagem sem

ultrapassar o limite máximo de temperatura tolerável pelo café pode ser o uso de fluxos de ar de secagem muito maiores que os utilizados comercialmente. No entanto, pouco se sabe sobre o efeito da utilização desses fluxos na qualidade do café.

Considerando-se a escassez de trabalhos que visam correlacionar a composição química com a qualidade sensorial do café, em função da interação entre o tipo de processamento e, principalmente, diferentes tratamento de secagem, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar as possíveis alterações na qualidade sensorial e nos teores de sacarose, glicose, frutose, rafinose e maltose, tanto para o café natural como para o despulpado, em função do fluxo e da temperatura do ar de secagem, bem como correlacionar o teor destes constituintes químicos com a qualidade sensorial do café.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Colheita e processamento do café

Para a condução do experimento, utilizaram-se frutos de café (*Coffea arabica* L., cv. Bourbon Amarelo) colhidos manualmente, selecionando apenas frutos maduros ou “cereja” do Sítio São José, localizado no município de Carmo de Minas, Minas Gerais (latitude: 22°07'57'' S; longitude: 45°13'27'' W; altitude: 1.345 m). Após a colheita, os frutos foram separados em água por diferença de densidade, removendo-se os de menor massa específica (secos, chochos, brocados e mal granados). Em seguida, nova seleção manual foi realizada para a retirada de frutos imaturos e sobremaduros remanescentes. Os frutos maduros e selecionados foram, então, divididos em duas partes: uma parte foi levada diretamente para os secadores, constituindo, assim, a porção de café “natural” (processamento via seca) e a outra parte foi descascada e deixada em tanques para fermentação em água em condições ambiente por 20 horas. Após a fermentação, o café foi lavado em água corrente, até a completa retirada da mucilagem remanescente. O café em pergaminho foi, então, levado ao secador, constituindo, assim, a porção café despulpado (processado via úmida). Todos os procedimentos de colheita e processamento foram realizados segundo Borém (2008).

Sistema de secagem

O sistema de secagem foi composto por três secadores de camada fixa (Figura 1). Nesses secadores, o fluxo de ar e a temperatura (T) do ar de secagem foram controlados com precisão por meio de um painel eletrônico.



Figura 1 Secadores utilizados para a secagem mecânica do café.

Cada secador é composto por três bandejas removíveis com fundos perfurados, de seção quadrada, com lados e profundidade iguais a 0,3 m. As bandejas ficaram dispostas sobre um plenum, para a uniformização do fluxo de ar. Os cafés natural e despulpado foram colocados nessas bandejas com, respectivamente, 5,7 e 2,3 kg, cada amostra, o que correspondeu a uma camada de 0,046 m e 0,106 m de café.

A velocidade do ar de secagem foi monitorada com o uso de um anemômetro de pás. Para todos os tratamentos, a velocidade foi regulada e mantida constante em 0,4 e 1,6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, correspondendo aos fluxos de 24 e 96 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente.

A partir dos resultados obtidos no trabalho relatado no artigo 1, escolheram-se dois fluxos de ar de secagem para serem utilizados nessa etapa do trabalho. Os escolhidos foram o fluxo de 24 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ e de 96 $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, o primeiro por ser, na maioria das vezes, o que melhor representa o utilizado pelos produtores, e o segundo por ter sido o fluxo que apresentou o menor tempo de secagem até o café atingir $0,125\pm 0,005$ (bs) no grão, tanto para o café natural como para o despulpado. Vale ressaltar que, a partir dos resultados do trabalho

apresentado no Artigo 1, não se observou diferença no tempo de secagem quando foram utilizados os fluxos de 96 e 132 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Portanto, escolheu-se o menor fluxo que proporcionou o menor tempo de secagem.

Duas temperaturas do ar de secagem foram utilizadas (40 e 45 °C). Seu monitoramento foi realizado por meio de termômetros de mercúrio colocados na massa de café.

Delineamento experimental

O delineamento experimental foi constituído de esquema fatorial 2x2x2, inteiramente casualizado, sendo duas formas de processamento (natural e despulpado), duas temperaturas de secagem (40 e 45 °C) e dois fluxos do ar de secagem (Tabela 1). Para cada tratamento foram realizadas três repetições.

Tabela 1 Tipo de processamento, natural (NAT) e despulpado (CD), temperatura (Tem) e fluxo do ar de secagem.

| Processamento | Tem (°C) | Fluxo ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|----------------------|-----------------|--|
| NAT | 40 | 24 |
| | | 96 |
| | 45 | 24 |
| | | 96 |
| CD | 40 | 24 |
| | | 96 |
| | 45 | 24 |
| | | 96 |

Descrição do processo de secagem

O teor de água médio do café no início da secagem foi de 2,18 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ e de 0,87 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (bs), para o café natural e o despulpado, respectivamente. A secagem foi contínua até o café atingir $0,145 \pm 0,005$ (bs) no fruto e $0,125 \pm 0,005$ (bs) no café em pergaminho, o que correspondeu a um teor de água de

0,125±0,005 (bs) para o café beneficiado. As bandejas contendo as amostras foram retiradas do secador e pesadas, a cada hora, em balança analítica com resolução de 0,01g, até o fim da secagem. Para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre as bandejas, fez-se um rodízio na posição das bandejas a cada pesagem.

O teor de água dos frutos de café e do café em pergaminho, no início e no fim da secagem, foi determinado utilizando-se o método padrão de estufa, a 105±3 °C, durante 24 horas, de acordo com Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Já o teor de água do café seco beneficiado foi determinado pelo método padrão ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2003). Conhecendo-se a massa e o teor de água inicial dos frutos e do café em pergaminho, o acompanhamento da secagem foi realizado pelo método gravimétrico (perda de massa), até atingir o teor de água desejado no café, utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,01 g, de acordo com a equação a seguir.

$$U_t = \frac{M_{a_i} - (M_{t_i} - M_{t_t})}{M_{m_s}} \quad (1)$$

em que

U_t : teor de água no tempo t (kg de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

M_{a_i} : massa de água inicial (kg);

M_{t_i} : massa total inicial (kg);

M_{t_t} : massa total no tempo t (kg);

M_{m_s} : massa de matéria seca (kg).

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

$$\text{Tx. Sec.} = \frac{U_{\text{ant}} - U_{\text{at}}}{\Delta t} \quad (2)$$

em que

Tx. Sec.: taxa de secagem (g de água.kg de matéria seca⁻¹.h⁻¹);

U_{ant}: teor de água no tempo anterior (g de água.kg de matéria seca⁻¹ (bs));

U_{at}: teor de água atual (g de água.kg matéria seca⁻¹ (bs));

Δt: intervalo de tempo entre as pesagens (h).

Armazenamento e beneficiamento das amostras

Após a secagem, as amostras foram embaladas em sacos de papel kraft pardo unifolhado, revestidos com sacos plásticos de polietileno transparentes. Em seguida, as amostras foram armazenadas em câmara fria com temperatura controlada a 10 °C e umidade relativa de 60%, por um período de 30 dias.

Posteriormente, o café foi beneficiado separando-se os grãos quanto à forma e ao tamanho, sendo utilizados somente os grãos chatos das peneiras 16 a 18/64 de polegada, eliminando-se os grãos chatos retidos na peneira 19/64 de polegada e os grãos ovais ou “mocas” retidos na peneira com crivo oblongo de 11/64 x ¾ de polegada. Na sequência, todos os defeitos foram retirados manualmente, visando à uniformização da matéria-prima, que foi utilizada para posterior análise química e sensorial.

Análise sensorial

A análise sensorial foi realizada por três juízes certificados de cafés especiais (SCAA *certified cupping judges*).

Foi utilizado o protocolo de análise sensorial da Associação Americana de Cafés Especiais (SCAA, sigla em inglês), 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 a 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 2 pontos para cada xícara que apresentar normalidade quanto à uniformidade, à doçura e à xícara limpa, avaliando-se 5 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 ± 1 ponto, conforme o sistema de classificação de cor, por meio de discos padronizados (SCAA/*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 8 horas e máxima de 24 horas da degustação.

Em cada avaliação sensorial foram degustadas cinco xícaras de café representativas de cada amostra, realizando-se uma sessão de análise sensorial para cada repetição, totalizando três repetições para cada tratamento.

Análises químicas

Para realizar as análises químicas, amostras dos grãos crus foram moídas por cerca de 2 minutos em moinho analítico Ika Modelo A11 Basic (IKA, Brasil), na presença de nitrogênio líquido, visando facilitar o processo de

moagem e garantir que não ocorressem quaisquer reações químicas e bioquímicas durante e após o processo de moagem. Após a moagem, as amostras foram acondicionadas em tubos falcon e armazenadas em freezer, à temperatura de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, até a realização das análises.

Para a extração dos açúcares, cerca de 100 mg de cada amostra de café cru moído foram pesados em um tubo de microcentrífuga de 2 mL. A cada amostra foi adicionado 1,0mL de Hexano PA para a extração dos compostos lipídicos, realizada por sonicação por 10 minutos, seguida por centrifugação a 6.000 rpm, por 2 minutos. A fase orgânica foi retirada e o solvente remanescente foi evaporado por 30 minutos. Às amostras tratadas foi adicionado 1,0 mL de água e elas foram submetidas a banho ultrassônico, a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 15 minutos. O tubo foi centrifugado, a 5.500 rpm, por 30 segundos e 500 μL do sobrenadante foram transferidos para um novo tubo, que foi submetido à centrifugação, por 10 minutos, a 8.000 rpm. O sobrenadante foi diluído e filtrado em uma membrana de 0,22 μm .

Para a quantificação dos açúcares analisados, utilizaram-se padrões de: glicose e maltose – Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EUA), sacarose e frutose – Fluka (St. Louis, MO) e rafinose - Acros Organics (Geel, Bélgica). A fase móvel foi preparada a partir de uma solução de NaOH 50-52% Sigma-Aldrich (St. Louis, MO). Todas as soluções foram preparadas utilizando-se água purificada por um sistema de purificação de água Milli-Q Milipore (Billerica, MA, EUA).

A quantificação foi realizada em um sistema HPLC Shimadzu (Kyoto, Japão), acoplado a um detector Antec DECADE II (Zoeterwoude, Holanda), sendo a cela eletroquímica equipada com eletrodo de ouro. O sistema de HPLC foi configurado para um fluxo isocrático de uma solução de NaOH 20mM, a $0,9\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. A separação foi realizada por uma coluna Dionex CarboPac PA1 250x4 mm d.i. (Sunnyvale, CA), equipada com pré-coluna e mantida a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os sacarídeos foram analisados por meio de detecção amperométrica pulsada.

As condições de detecção foram: E1 = +0,05 V, t1= 500 ms, ts = 60 ms; E2 = +0,75 V, t2= 130 ms; E3 = -0,80 V, t3= 120 ms.

As concentrações foram calculadas a partir da área dos cromatogramas obtidos e os resultados dos teores de cada açúcar foram dados em porcentagem de matéria seca (% m.s).

Análise estatística

Com o objetivo de melhor compreender o efeito de todos os fatores estudados, os dados foram submetidos à análise multivariada. A discriminação dos grupos de tratamentos foi realizada pela análise dos componentes principais (ACP), a partir da interação entre processamento, temperatura e fluxo do ar de secagem, resultando em agrupamentos de acordo com a composição química e a análise sensorial do café, utilizando o software estatístico Chemoface (NUNES et al., 2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados o tempo de secagem, a taxa de secagem média e os teores de água inicial e final, em função do tipo de processamento, da temperatura e do fluxo de ar de secagem.

Tabela 2 Tempo de secagem, teor de água inicial e final e taxa de secagem média, em função do processamento (Proc.), natural (NAT) e despulpado (CD), da temperatura (Tem) e do fluxo de ar de secagem.

| Proc. | Tem (°C) | Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²) | Tempo de secagem (h) | Teor de água (bs) | | Taxa de secagem (g.kg ⁻¹ .h ⁻¹) |
|-------|----------|---|----------------------|-------------------|-------|--|
| | | | | Inicial | Final | |
| NAT | 40 | 24 | 87,65 | 2,21 | 0,145 | 37,3 |
| | | 96 | 82,63 | 2,18 | 0,145 | 39,3 |
| | 45 | 24 | 56,18 | 2,19 | 0,145 | 46,1 |
| | | 96 | 49,81 | 2,14 | 0,145 | 51,4 |
| CD | 40 | 24 | 18,75 | 0,86 | 0,125 | 42,4 |
| | | 96 | 14,70 | 0,85 | 0,125 | 49,8 |
| | 45 | 24 | 10,60 | 0,89 | 0,125 | 72,4 |
| | | 96 | 9,32 | 0,88 | 0,125 | 82,0 |

Na Tabela 2 verifica-se que, para o fluxo de 24 m³.min⁻¹.m⁻², o aumento da temperatura (de 40 para 45 °C) proporcionou redução de 36% (87,65-56,18 horas) e 43% (18,75-10,60 horas) no tempo de secagem para o café natural e o despulpado, respectivamente. Aumentando o fluxo de ar de 24 para 96 m³.min⁻¹.m⁻², na secagem do café natural, observa-se redução de 6% (87,65-82,63 horas) e 11% (56,18-49,81 horas) no tempo de secagem, para as temperaturas de 40 °C e 45 °C. A mesma elevação nos valores do fluxo de ar, para o café despulpado, proporcionou redução de 22% (18,75-14,70 horas) e 12% (10,60-9,32 horas) para as temperaturas de 40 °C e 45 °C.

Na Figura 2 são apresentadas as curvas de secagem dos frutos de café (natural) e do café em pergaminho (despolpado) submetidos à secagem completa em secador.

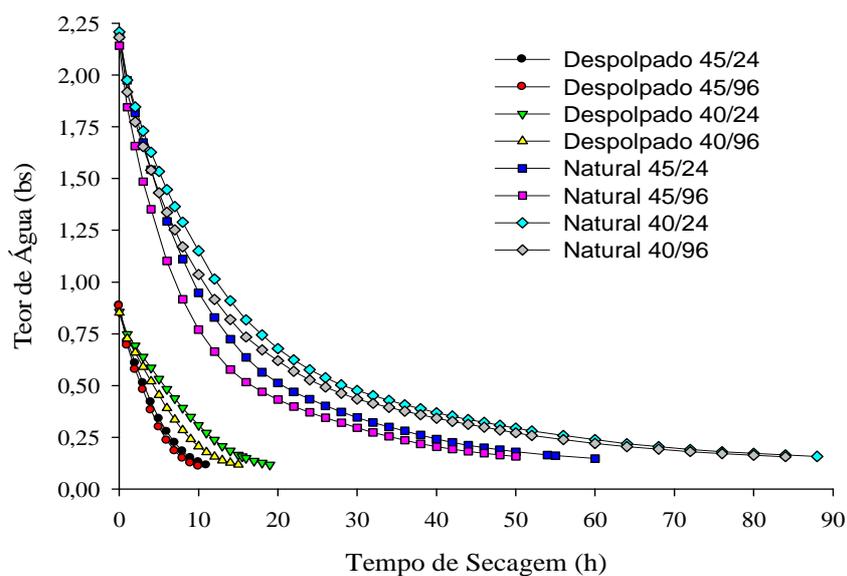


Figura 2 Curva de secagem do café natural e despolpado.

Verifica-se (Figura 2) que o café despolpado apresentou menores tempos de secagem que o natural. Observa-se, ainda, dentro do mesmo processamento, que a elevação da temperatura e do fluxo de ar proporcionou maiores taxas de secagem, reduzindo o tempo total de secagem.

O aumento da temperatura do ar resulta em maior diferença entre a pressão de vapor do ar de secagem e do produto, fazendo com que a água seja removida com mais facilidade e rapidez (SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2012). Além disso, na literatura há relatos de outras causas para a redução do tempo de secagem com a elevação da temperatura. O aumento da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente a resistência do fluido ao

escoamento. A diminuição da viscosidade facilita a difusão das moléculas de água nos capilares do produto, além de proporcionar aumento no nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para elevação da taxa de secagem (CORRÊA et al., 2010).

O efeito do fluxo de ar, para o mesmo processamento e temperatura, é mais evidente no início da secagem. Com o decorrer do processo de secagem, a remoção da água do café fica mais difícil em função da ligação mais forte entre a água e os demais constituintes do grão. Logo, as taxas de secagem, para os dois fluxos de ar e para as duas temperaturas, tendem a se igualar ou ficar mais próximas no final do processo, para o mesmo processamento. Esses resultados refletem o que a literatura descreve para a teoria geral de secagem de produtos agrícolas (BORÉM, 2008; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; PABIS; JAYAS; CENKOWSKI, 1998; SILVA, 2008).

O fenômeno de migração de água do interior de grãos não é totalmente conhecido. Ainda assim, numerosos mecanismos térmicos e físicos têm sido propostos para descrever o transporte de água em produtos capilares porosos higroscópicos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Porém, teorias mais recentes preconizam que, em determinada fase da secagem, o movimento da água seja, basicamente, determinado pela difusão de líquido (BORÉM et al., 2008). A difusão de líquido será facilitada tanto pelo aumento da temperatura como pela remoção de barreiras físicas, como ocorre no despolpamento do café comparativamente à secagem do café natural. O efeito do fluxo de ar sobre a taxa de secagem é mais evidente quando o produto ainda apresenta elevados teores de água, o que também concorda com a teoria geral da secagem.

Na Tabela 3 são apresentados os teores médios de sacarose, rafinose, frutose, glicose e maltose (% m.s), as notas dos atributos aroma, sabor, corpo e

finalização, e a nota final da análise sensorial, em função das combinações entre processamento, temperatura e fluxo de ar de secagem.

Tabela 3 Teores médios de sacarose, rafinose, frutose, glicose e maltose, nota da análise sensorial total e dos atributos aroma, sabor, corpo e finalização em função do processamento, temperatura e fluxo de ar de secagem.

| Variáveis analisadas | Tratamento | | | | | | | |
|----------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | N4024 | N4096 | N4524 | N4596 | CD4024 | CD4096 | CD4524 | CD4596 |
| Sacarose | 4,7183 | 5,0375 | 4,4903 | 5,1372 | 3,6276 | 3,3185 | 3,4982 | 2,6830 |
| Rafinose | 0,0889 | 0,1571 | 0,1342 | 0,1506 | 0,1352 | 0,0969 | 0,1202 | 0,0815 |
| Frutose | 0,1439 | 0,1128 | 0,1137 | 0,0863 | 0,0059 | 0,0003 | 0,0123 | 0,0176 |
| Glicose | 0,0798 | 0,0629 | 0,0637 | 0,0520 | 0,0050 | 0,0027 | 0,0044 | 0,0050 |
| Maltose | 0,0664 | 0,0902 | 0,0729 | 0,0526 | 0,0268 | 0,0228 | 0,0314 | 0,0236 |
| Aroma | 7,50 | 7,17 | 7,58 | 7,58 | 7,75 | 7,25 | 7,50 | 7,50 |
| Sabor | 7,50 | 7,42 | 7,42 | 7,42 | 7,83 | 7,25 | 7,42 | 7,42 |
| Corpo | 7,50 | 7,33 | 7,50 | 7,42 | 7,50 | 7,50 | 7,42 | 7,33 |
| Finalização | 7,58 | 7,08 | 7,25 | 7,00 | 7,50 | 7,33 | 7,42 | 7,50 |
| Total | 82,50 | 80,75 | 81,67 | 81,33 | 83,25 | 81,50 | 81,92 | 81,83 |

N = natural, CD = despoldado, 40 = 40 °C, 45 = 45 °C, 24 = fluxo de 24 m³.m⁻¹.m⁻², 96 = fluxo de 96 m³.m⁻¹.m⁻².

A análise multivariada de componentes principais (ACP) é realizada visando reduzir variáveis e discriminar grupos. Quando usada para reduzir variáveis, considera-se adequada para a sua realização uma variabilidade acumulada acima de 70%. Por outro lado, quando o objetivo da análise é discriminar grupos, como é o caso deste experimento, considera-se adequado, para a sua realização, uma variabilidade acumulada acima de 60% (REINATO et al., 2012).

Nas Figuras 3 e 4 mostram-se os biplots obtidos de acordo com a dispersão dos escores dos primeiros componentes principais nos eixos, sendo o primeiro componente o de maior variância, seguido pelo segundo de menor

variância, sendo possível detectar quais foram as características que mais contribuíram para os agrupamentos formados.

Na Figura 3 observa-se uma representação dos resultados obtidos da ACP referente à distribuição dos diferentes tipos de processamento (natural e despulpado) e tratamentos de secagem (temperatura e fluxo de ar de secagem), em função dos teores médios dos açúcares encontrados nos grãos crus. Na representação gráfica por ACP, cada eixo (componente principal) explica uma porcentagem da variação total entre as amostras. Os dois primeiros componentes principais explicam 96,99% (79,11% + 17,88%) da variabilidade das respostas, o que demonstra excelente explicação da variação ocorrida, em relação aos teores destes compostos químicos.

Nos biplots apresentados nas Figuras 3 e 4, o ângulo formado pelos vetores corresponde à correlação entre os autovetores, representando as variáveis estudadas. Quanto menor o ângulo entre os vetores, maior a correlação entre as variáveis. Já a representação da interação entre processamento, temperatura e fluxo de ar de secagem é dada por pontos. Quanto mais próximo um ponto do outro, maior a similaridade entre os valores das variáveis estudadas.

Observa-se, na Figura 3, que os vetores que representam as variáveis glicose e frutose apresentaram um pequeno ângulo entre eles, apresentando alta correlação. Logo, o teor de glicose e frutose tem comportamento similar em função das variáveis estudadas, o que pode estar relacionado ao fato de tanto a glicose como a frutose serem monossacarídeos com estruturas parecidas, apresentando a mesma fórmula molecular. Kleinwächter e Selmar (2010), estudando a influência do processo de secagem nos teores de açúcares nos grãos de café processados por via úmida, verificaram que a glicose e a frutose apresentam comportamento semelhante com relação à sua concentração durante o processo de secagem.

O primeiro componente principal sugere semelhança entre os pontos, formando dois grupos distintos da interação entre processo, temperatura e fluxo de ar de secagem: o primeiro (I), com os pontos alocados à esquerda no biplot (N4024, N4096, N4524 e N4596) e o segundo (II), com pontos alocados à direita do biplot (CD4024, CD4096, CD4524 e CD4596) (Figura 3).

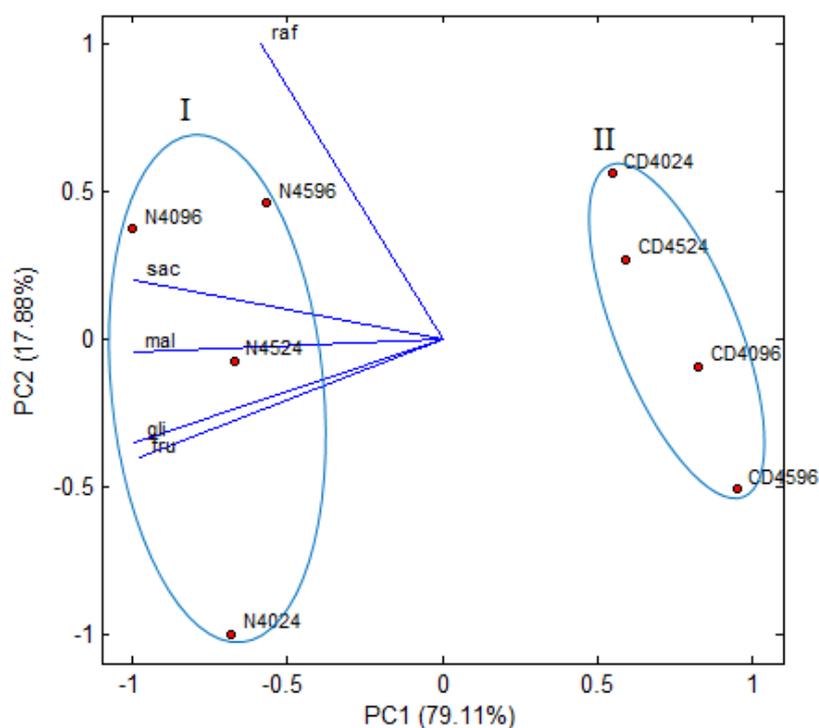


Figura 3 Biplot dos dois primeiros eixos da análise de componentes principais para dados de dois tipos de processamento (N = natural e CD = despolpado), duas temperaturas do ar de secagem (40 = 40 °C e 45 = 45 °C) e dois fluxos de ar de secagem (24 = 24 m³.m⁻¹.m⁻² e 96 = 96 m³.m⁻¹.m⁻²), em função dos teores médios de alguns açúcares. sac = sacarose; raf = rafinose; mal = maltose; fru = frutose; gli = glicose.

Os resultados observados na Tabela 4 indicam que as variáveis cujas contribuições tiveram maior importância para a formação da componente 1 (PC1) foram os teores de sacarose, frutose, glicose e maltose. Já em relação à

componente 2 (PC2), o teor de rafinose foi a variável que mais influenciou para a sua formação.

Observa-se, na Figura 3, que a discriminação dos dois grupos formados (I e II) deve-se, principalmente, à componente 1 (PC1), cuja formação é função das diferenças no teores de sacarose, frutose, glicose e maltose. Os cafés pertencentes ao grupo I apresentaram alta correlação com esta componente, quando comparados aos do grupo II. Todos os cafés pertencentes ao grupo I são cafés naturais com teores de sacarose, glicose, frutose e maltoses maiores que os cafés despulpados (grupo II) (Tabela 4).

Tabela 4 Correlações entre os parâmetros avaliados (sacarose, rafinose, frutose, glicose e maltose) e os dois primeiros componentes principais.

| Parâmetros | PC1 (79,11%) | PC2 (17,88%) |
|------------|--------------|--------------|
| Sacarose | -0,99 | 0,20 |
| Rafinose | -0,59 | 1,00 |
| Frutose | -0,98 | -0,40 |
| Glicose | -0,99 | -0,35 |
| Maltose | -1,00 | -0,05 |

Considerando que, na literatura científica, há escassez de trabalhos que visam correlacionar a composição química em função da interação entre o tipo de processamento e o tratamento de secagem do café com a qualidade da bebida, um novo biplot foi gerado (Figura 4). Para a sua formação, realizou-se análise de componentes principais a partir das diferentes combinações do tipo de processamento, temperatura e fluxo de ar de secagem para alguns atributos sensoriais, nota sensorial final, teor de sacarose, rafinose e maltose.

Na Figura 4, os dois primeiros componentes principais explicam 75,37% (48,18% + 27,19%) da variabilidade das respostas, o que demonstra boa explicação da variação ocorrida entre as amostras das variáveis estudadas.

A partir dos resultados da Tabela 5 observa-se que as variáveis que mais contribuíram para a formação da componente 1 (PC1) foram a nota sensorial final e a nota do atributo sensorial finalização. Já em relação à componente 2 (PC2), os teores de sacarose e rafinose, em conjunto com a nota dos atributos sensoriais aroma e sabor, constituíram as variáveis que mais influenciaram para a sua formação.

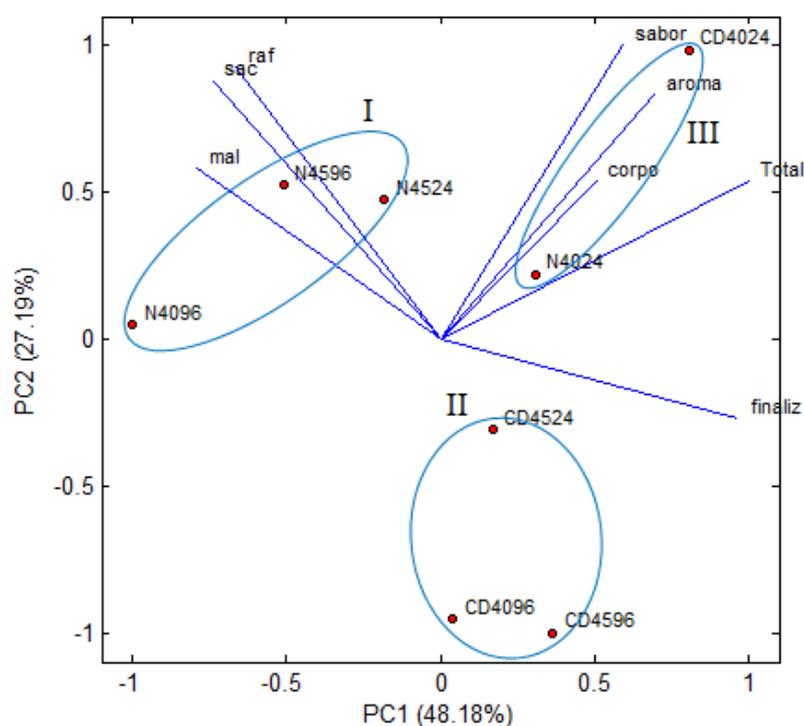


Figura 4 Biplot dos dois primeiros eixos da análise de componentes principais para dados de dois tipos de processamento (N = natural e CD = despoldado), duas temperaturas do ar de secagem (40 = 40 °C e 45 = 45 °C) e dois fluxos de ar de secagem (24 = 24 m³.m⁻¹.m⁻² e 96 = 96 m³.m⁻¹.m⁻²), em função dos teores médios de alguns açúcares, nota sensorial final e de alguns atributos sensoriais. sac = sacarose; raf = rafinose; mal = maltose; Total = nota sensorial final; finaliz = finalização; aroma = fragrância/aroma.

Observa-se, na Figura 4, que a formação dos grupos I e II deve-se, principalmente, às diferenças nos teores de maltose, sacarose, rafinose e da nota do atributo sensorial finalização. O grupo I é composto somente por cafés naturais, apresentando maiores teores de maltose, sacarose, rafinose e menor nota do atributo sensorial finalização. O grupo II é constituído apenas por cafés despulpados com menores concentrações de maltose, sacarose, rafinose e maiores notas no atributo sensorial finalização (Tabela 3). Verifica-se, na Figura 4, que os tratamentos presentes nos grupos I e II correspondem aos mesmos presentes nos grupos I e II da Figura 3, embora a porcentagem de variância explicada tenha sido menor.

Tabela 5 Correlações entre os parâmetros avaliados (sacarose, rafinose, maltose, nota sensorial final e dos atributos sensoriais aroma, sabor, corpo e finalização) e os dois primeiros componentes principais.

| Parâmetros | PC1 (48,18%) | PC2 (27,19%) |
|-------------|--------------|--------------|
| Sacarose | -0,74 | 0,88 |
| Rafinose | -0,66 | 0,92 |
| Maltose | -0,79 | 0,58 |
| Total | 1,00 | 0,54 |
| Aroma | 0,69 | 0,83 |
| Sabor | 0,59 | 1,00 |
| Corpo | 0,51 | 0,54 |
| Finalização | 0,96 | -0,27 |

A inclusão da nota sensorial final em conjunto com os atributos sensoriais permitiu a formação do terceiro grupo. O Grupo III (Figura 4) é formado por um café natural e um café despulpado, ambos secos com temperatura de 40 °C e com fluxo de ar de 24 m³.min⁻¹.m⁻². Pode-se observar que as variáveis que mais contribuíram para a discriminação desse grupo foram a nota sensorial final e os atributos sensoriais sabor, aroma e corpo. Independente do tipo de processamento e dos teores de sacarose, rafinose,

glicose, frutose e maltose, cafés secos à temperatura de 40 °C e fluxo de ar de $24 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ tendem apresentar maiores notas nos atributos sensoriais sabor, aroma e corpo, e, conseqüentemente, maiores notas sensoriais finais (Tabela 3), demonstrando a interferência das condições de secagem na qualidade sensorial do café.

Quando se utiliza a temperatura de 45 °C, independente do fluxo de ar, a tendência é uma qualidade sensorial menor, tanto para o café natural como para o despolpado. Para a temperatura de 40 °C, isso somente é observado para o fluxo de ar mais elevado. Nessas condições de secagem, a taxa de remoção de água é maior. Normalmente, altas taxas de secagem causam danos às membranas celulares, promovendo extravasamento do conteúdo celular e, conseqüentemente, prejudicando a qualidade da bebida.

4 CONCLUSÕES

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

- o conteúdo de açúcares não é influenciado pela temperatura e pelo fluxo de ar de secagem;
- o teor de sacarose, rafinose, maltose, glicose e frutose não apresenta relação com a qualidade sensorial;
- cafés naturais apresentam maiores teores de sacarose, glicose, frutose e maltose;
- cafés secos à temperatura de 40 °C e fluxos de 24 m³min⁻¹m⁻² apresentam melhor qualidade sensorial em relação aos demais tratamentos, independente do processamento.

REFERÊNCIAS

- BERTRAND, B. et al. Comparison of the effectiveness of fatty acids, chlorogenic acids, and elements for the chemometric discrimination of coffee (*Coffea arabica* L.) varieties and growing origins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 56, n. 6, p. 2273-2280, Feb. 2008.
- BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. v. 1, 631 p.
- BORÉM, F. M. et al. Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1605-1615, set./out. 2008.
- BRADBURY, A. G. W. Chemistry I: non-volatile compounds, part 1A: carbohydrates. In: CLARKE, R. J.; VITZTHUM, O. G. (Ed.). **Coffee recent developments**. Oxford: Blackwell Science, 2001. p. 1-17.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.
- BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450 p.
- CORADI, P. C. et al. Effect of drying and storage conditions on the quality of natural and washed coffee. **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 38-47, Jan./June 2007.
- 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.
- DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de alimentos de Fennema**. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

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

FIGUEIREDO, L. P. **Abordagem sensorial e química da expressão de genótipos de Bourbon em diferentes ambientes**. 2013. 127 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

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

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

JOET, T. et al. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. **Food Chemistry**, Oxford, v. 118, n. 3, p. 693-701, Feb. 2010.

KLEINWÄCHTER, M.; SELMAR, D. Influence of drying on the content of sugars in wet processed green Arabica coffees. **Food Chemistry**, Oxford, v. 119, n. 2, p. 500-504, Mar. 2010.

KNOPP, S.; BYTOF, G.; SELMAR, D. Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans. **European Food Research and Technology**, Berlin, v. 223, n. 2, p. 195-201, 2006.

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.

LIMA, A. R. et al. Compostos bioativos do café: atividade antioxidante in vitro do café verde e torrado antes e após a descafeinação. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 20-24, jan. 2010.

LIMA, D. M. **Armazenabilidade de sementes de *Coffea arabica* L. e de *Coffea canephora* Pierre, submetidas a diferentes métodos de desmucilagem e de secagem.** 2005. 106 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

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

LOPES, L. M. V. **Avaliação da qualidade de grãos crus e torrados de cultivares de cafeeiro (*Coffea arabica* L.).** 2000. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

MALTA, M. R. et al. Composição química, produção e qualidade do café fertilizado com diferentes fontes e doses de nitrogênio. **Revista Ciência e Tecnologia**, Lavras, v. 27, n. 6, p. 1246-1252, dez. 2003.

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.

MENDONÇA, L. M. V. L. et al. Composição química de grãos crus de cultivares de *Coffea arabica* L. suscetíveis e resistentes à *Hemileia vastatrix* Berg et Br. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 413-419, mar./abr. 2007.

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

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

ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL CAFÉ. **Estudios de investigación de evaluación sensorial sobre la calidad del café cultivado en la región de Patrocinio en el Estado de Minas Gerais en Brasil.** London, 1991. 28 p.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice.** New York: J. Wiley, 1998. 303 p.

PEREIRA, R. G. F. A. **Efeito da inclusão de grãos defeituosos na composição química e qualidade do café (*Coffea arabica* L.) “Estritamente Mole”.** 1997. 96 p. Tese (Doutorado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

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.

SELMAR, D. et al. Biochemical insights into coffee processing: quality and nature of green coffee are interconnected with an active seed metabolism. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN COFFEE SCIENCE, 20., 2004, Bangalore. **Proceedings...** Bangalore: ASIC, 2004. 1 CD-ROM.

SILVA, E. A. et al. The influence of water management and environmental conditions on the chemical composition and beverage quality of coffee beans. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 229-238, 2005.

SILVA, J. S. Secagem e secadores. In: _____. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas.** Viçosa, MG: UFV, 2008. p. 109-146.

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.

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.

VILAS BOAS, B. M. de et al. Seleção de extratores e tempo de extração para determinação de açúcares em café torrado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 5, p. 1169-1173, set./out. 2001.

VILLELA, T. C. **Qualidade de café despulpado, desmucilado, descascado e natural, durante o processo de secagem.** 2002. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.