



DANILO BARBOSA CARDOSO

**SECAGEM DE FRUTOS VERDES DE CAFÉ EM
DIFERENTES TEMPERATURAS DE BULBO SECO E
TEMPERATURAS DE PONTO DE ORVALHO**

**LAVRAS - MG
2022**

DANILO BARBOSA CARDOSO

**SECAGEM DE FRUTOS VERDES DE CAFÉ EM DIFERENTES TEMPERATURAS
DE BULBO SECO E TEMPERATURAS DE PONTO DE ORVALHO**

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

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade
Orientador
Prof. Dr. Flávio Meira Borém
Coorientador

**LAVRAS - MG
2022**

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

Cardoso, Danilo Barbosa.

Secagem de frutos verdes de café em diferentes temperaturas
de bulbo seco e temperatura de ponto de orvalho / Danilo Barbosa
Cardoso. - 2021.

78 p. : il.

Orientador(a): Ednilton Tavares Andrade.

Coorientador(a): Flávio Meira Borém.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Café. 2. Secagem. 3. Qualidade. I. Andrade, Ednilton
Tavares. II. Borém, Flávio Meira. III. Título.

DANILO BARBOSA CARDOSO

**SECAGEM DE FRUTOS VERDES DE CAFÉ EM DIFERENTES TEMPERATURAS
DE BULBO SECO E TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO**

**DRYING GREEN COFFEE FRUITS AT DIFFERENT DRY BULB TEMPERATURES
AND DEW POINT TEMPERATURE**

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

APROVADA em 18 de novembro de 2021.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade, UFLA

Prof. Dr. Nelson Gutiérrez Guzmán, Universidad Surcolombiana

Dr. Marcelo Ribeiro Malta, EPAMIG

Dra. Sttela Dellyzete Veiga Franco da Rosa, EMBRAPA

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa, UFLA



Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Orientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém

Coorientador

LAVRAS - MG

2022

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio para realização do meu doutorado.

Ao setor de Cafeicultura do Departamento de Agricultura da UFLA, e o servidor técnico Mauro, pela disponibilidade do café que foi utilizado nessa pesquisa.

Ao prof. Dr. Mário Lucio, coordenador do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT – Café), e o servidor técnico, Alexandre, pela disponibilidade da realização das análises químicas no meu material de estudo.

À equipe do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural- UFLA, e amiga Amanda, pelo apoio nas análises de microscopia eletrônica de varredura.

Ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas (LPPA) do Departamento de Engenharia Agrícola pela disponibilização dos equipamentos onde foi conduzido o experimento e análises diversas.

A servidora técnica do LPPA, Dr. Ana Paula, e pós-doutoranda, Cláudia, por todo o apoio, carinho, companheirismo, conselhos.

Ao meu orientador professor Dr. Ednilton Andrade, pelas orientações, disponibilidade, incentivo, paciência e grande apoio durante a realização desse trabalho.

Ao meu coorientador professor Dr. Flávio Borém, pelas oportunidades e muitos ensinamentos.

Ao prof. Dr. Roney Rocha, prof. Dr. Jefferson Corrêa, Dra. Sttela Dellyzete, Dr. Marcelo Malta, prof. Dr. Nelson Guzmán, por toda colaboração e disponibilidade no aprimoramento do trabalho.

Aos colegas, de iniciação científica, que me ajudaram na colheita do café, Maria Luiza, Fernando, Carolina Abreu, Carolina Garcia, Rhuane, Túlio, muito obrigado por toda ajuda.

Aos colegas, da pós graduação, Paula, Felipe, Bárbara, pelo apoio durante o experimento e escrita da tese. A todos os amigos que fiz, do LPPA, Diego, Camila, Isabela, Giselle, Mariane, e tantos outros que tive o prazer de conhecer e compartilhar momentos, durante esse período de pós-graduação.

Aos meus pais José Cardoso e Joaquina, e meu irmão Maurílio por todo apoio, incentivo e amor.

Aos meus amigos Murilo, Marcos, Elayne, Eduardo, Dyogo, Gabriel, Andrés, Renato, pela amizade, incentivo, confiança.

Em especial a Luciana Vieira, por todo amor, carinho, companheirismo, apoio, os meus sinceros e profundos agradecimentos.

E a todos que de alguma maneira torceram e contribuíram para concretização desta tese.

Obrigado!

RESUMO

A colheita de café no Brasil é predominantemente não seletiva, pelo método de derriça completa, e pela desigualdade de maturação, acarreta uma grande porção de frutos verdes. Uma das principais etapas do processo de pós-colheita é a secagem e esse deve ser bem estabelecido para esse tipo de fruto, por serem mais sensíveis a essa etapa do processamento. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da secagem em diferentes temperaturas de bulbo seco em combinação com diferentes temperaturas de ponto de orvalho sobre os frutos verdes de café e na qualidade dos grãos. Os frutos verdes foram colhidos de forma manual e seletivamente, e apresentaram em média o teor de água inicial de $2,50 \pm 0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.s.). A secagem foi realizada em um secador de camada fixa acoplado a um sistema de ar condicionado composto no qual o ar de secagem foi controlado com um fluxo de ar de $20 \text{ m}^3\text{min}^{-1}\text{m}^{-2}$, a temperaturas usadas foram três temperaturas de bulbo seco ($30 \text{ }^\circ\text{C}$, $35 \text{ }^\circ\text{C}$ e $40 \text{ }^\circ\text{C}$) em combinação de 4 temperaturas de ponto de orvalho ($7,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $11,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $16,2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $20,4 \text{ }^\circ\text{C}$). Os frutos verdes foram secos de forma contínua até um teor de água médio de 0,139 base seca (b.s.). Foram testados modelos de cinética de secagem aos dados experimentais, avaliados os endospermas dos grãos com a microscopia eletrônica de varredura, analisados a quantidade de defeitos pretos-verdes, alterações na cor, condutividade elétrica dos exsudados dos grãos e quantificação de trigonelina, ácidos clorogênicos e cafeína. O modelo de Andrade foi o que apresentou o melhor ajuste, exceto nos tratamentos com Tbs de 40°C e Tpo de $7,5^\circ\text{C}$ e Tpo de $11,2^\circ\text{C}$, que foram os modelos de Valcam e Midilli respectivamente. Verificou-se por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) que ocorreram danos nos grãos verdes com o aumento da temperatura e nos grãos pretos-verdes sua estrutura celular sempre está bem degradada independentemente dos tratamentos de secagem realizada. As menores quantidades de defeitos pretos-verdes foram encontradas nas menores temperaturas de secagem, apresentado esses grãos os maiores valores de L^* e b^* , e menores de a^* ; também menores valores de condutividade elétrica e de ácidos clorogênicos.

Palavras – chave: *Coffea arabica* L.. Secagem. Frutos imaturos. MEV. Pretos-verdes. Bioativos.

ABSTRACT

The coffee harvest in Brazil is predominantly non-selective, by the complete stripping method, and due to the inequality of maturation, it results in a large portion of green fruits. One of the main stages of the post-harvest process is drying and this must be well established for this type of fruit, as they are more sensitive to this stage of processing. The general objective of this work was to evaluate the effect of drying at different dry bulb temperatures in combination with different dew point temperatures on green coffee fruits and on the quality of the grains. The unripe fruits were harvested manually and selectively, and had an average initial water content of $2.50 \pm 0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.s.). Drying was carried out in a fixed layer dryer coupled to a composite air conditioning system in which the drying air was controlled with an air flow of $20 \text{ m}^3\text{min}^{-1}\text{m}^{-2}$, at temperatures used were three dry bulb temperatures (30 °C, 35 °C and 40 °C) in combination of 4 dew point temperatures (7.5 °C, 11.2 °C, 16.2 °C and 20.4 °C). The unripe fruits were continuously dried to an average water content of 0.139 dry basis (ds). Models of drying kinetics were tested on the experimental data, evaluated the endosperms of the grains with scanning electron microscopy, analyzed the number of black-green defects, changes in color, electrical conductivity of the grain exudates and quantification of trigonelline, chlorogenic acids and caffeine. The Andrade model showed the best fit, except for treatments with Tbs of 40°C and Tpo of 7.5°C and Tpo of 11.2°C, which were the Valcam and Midilli models respectively. It was verified by means of scanning electron microscopy (SEM) that damage occurred in the green beans with the increase of temperature and in the black-green beans their cell structure is always well degraded regardless of the drying treatments performed. The smallest amounts of black-green defects were found at the lowest drying temperatures, with these grains presenting the highest values of L* and b*, and the lowest values of a*; also, lower values of electrical conductivity and chlorogenic acids.

Keywords: *Coffea arabica* L.. Drying. Immature fruits. SEM. Black-greens. Bioactive.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema utilizado na secagem mecânica.	32
Figura 2 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Andrade para a Tbs 30 °C	44
Figura 3 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Andrade para a Tbs 35 °C.	45
Figura 4 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Andrade para a Tbs 40 °C.	45
Figura 5 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Valcam para a Tbs 40 °C.....	46
Figura 6 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a Tbs 40 °C.....	46
Figura 7 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes que tiveram o tratamento de secagem de 30 °C de Tbs e 20,4 °C de Tpo (154 horas de secagem). Setas na cor cinza indicam o lúmen vazio.	48
Figura 8 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos pretos-verdes que tiveram o tratamento de secagem de 30 °C Tbs / 20,4 °C Tpo (154 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.	49
Figura 9 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes do tratamento de secagem 35 °C Tbs / 16,2 °C Tpo (108 horas de secagem). Setas pretas indicam membranas plasmáticas mais degradadas e em menor quantidade.....	50
Figura 10 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos pretos-verdes do tratamento de secagem 35 °C Tbs / 16,2 °C Tpo (108 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.	51
Figura 11 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes do tratamento de secagem 40 °C Tbs / 7,5 °C Tpo (62 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.	52
Figura 12 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos pretos-verdes do tratamento de secagem 40 °C Tbs / 7,5 °C Tpo (62 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.	53
Figura 13 - Sistema utilizado na secagem mecânica.	62

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Colheita e Processamento do café	14
2.2 Secagem do café	16
2.3 Colorimetria	18
2.4 Aspectos ultraestruturais e qualidade do café	18
2.5 Trigonelina, ácido clorogênico e cafeína	19
2.6 Modelagem matemática e simulação da secagem	21
REFERÊNCIAS	23
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	28
ARTIGO 1 – ALTERAÇÕES ULTRAESTRUTURAIS DE FRUTOS VERDES DE CAFÉ SECADOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES CONTROLADAS DO AR DE SECAGEM	29
1. INTRODUÇÃO	30
2. MATERIAL E MÉTODOS	31
2.1 Obtenção, descrição da matéria-prima e teor de água	31
2.2 Sistema de secagem.....	32
2.3 Procedimento e delineamento experimental	33
2.4 Coeficiente de difusão efetivo e taxa de secagem	35
2.5 Modelagem da secagem.....	36
2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	38
3.RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
3.1 Modelagem matemática	40
3.2 Microscopia eletrônica de varredura.....	47
4.CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS	55

ARTIGO 2 - QUALIDADE DE FRUTOS VERDES DE CAFÉ SECOS EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE BULBO SECO E TEMPERATURAS DE PONTO DE ORVALHO.....	59
1.INTRODUÇÃO	60
2.MATERIAL E MÉTODOS	61
2.1 Obtenção e descrição da matéria-prima.....	61
2.2 Sistema de secagem.....	61
2.3 Procedimento e delineamento experimental	62
2.4 Classificação física	64
2.5 Análise de cor	65
2.6 Condutividade elétrica	65
2.7 Análise de bioativos	65
2.8 Análises estatísticas	66
3.RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
3.1 Quantidade de defeitos pretos-verdes.....	66
3.2 Parâmetros colorimétricos.....	67
3.3 Condutividade elétrica	69
3.4 Compostos bioativos	71
4.CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS	75

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de café, com uma produção de estimada, em maio de 2021, de 48,81 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2021)

Uma das características da cafeicultura brasileira é que a maioria dos produtores, ao realizar a colheita, retiram-se todos os frutos do arbusto de café (CALDEIRA *et al.*, 2017). Com a característica de o cafeeiro apresentar várias floradas durante seu desenvolvimento e no momento da colheita ocorrem frutos em diferentes estádios de maturação, e cada lote têm suas particularidades na hora da secagem.

Apesar de existirem técnicas para a separação dos frutos verdes, da porção colhida, durante os processos de pós colheita, se o produtor não dispõe desses recursos, e seu lote apresentar uma porcentagem superior a 30% de frutos imaturos, seus cuidados para a secagem deveriam ser iguais ao de um lote que tivessem somente frutos desse estágio de maturação. E mesmo havendo uma recomendação de início de colheita quando se tem de 5% a 20% de cafés verdes (MESQUITA *et al.*, 2016), se o produtor não conseguir seguir esses parâmetros, é preferível ter uma maior proporção de cafés verdes do que de sobre maduros. A colheita, quando feita muito cedo, produz cafés com grande porcentagem de frutos verdes, e quando feita muito tarde resulta em grande quantidade de frutos secos; nestes dois casos o café resultante tenderá a ser de qualidade inferior (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014)

Uma condução adequada dos processos de pós colheita e uma apropriada secagem artificial dos frutos verdes propiciam uma menor quantidade de defeitos pretos verdes trazendo, assim, aos produtores, menores depreciações aos lotes, então conhecer como as condições do ar de secagem interferem na qualidade final do café se torna de grande importância.

Por tanto neste estudo utilizou-se de diferentes tratamentos de secagem para avaliar qual foi sua influência sobre um lote de frutos verdes, no intuito da escolha dos melhores parâmetros do sistema de secagem que propiciará a melhor qualidade possível para esses tipos de frutos.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da secagem em diferentes temperaturas de bulbo seco em combinação com diferentes temperaturas de ponto de orvalho sobre os frutos verdes de café e na qualidade dos grãos.

E os objetivos específicos foram:

Avaliação da cinética de secagem do café natural verde, com o ajuste de modelos matemáticos aos valores experimentais dos diferentes tratamentos.

Avaliar os efeitos na estrutura celular do endosperma dos grãos de café secados em diferentes temperaturas de bulbo seco e da temperatura de ponto de orvalho do ar de secagem.

Avaliar após os tratamentos de secagem a quantidade de defeitos pretos-verdes nas amostras.

Avaliar os efeitos dos tratamentos de secagem sobre a estrutura celular com avaliação de condutividade elétrica.

Avaliar as alterações de parâmetros colorimétricos em decorrência dos diferentes tratamentos de secagem.

Avaliar os efeitos dos diferentes tratamentos de secagem nos teores de trigonelina, ácido clorogênico e cafeína nos grãos de café de frutos verdes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Colheita e Processamento do café

A cafeicultura é uma das principais fontes de divisas para o Brasil que tem se destacado, desde o final do século XIX, como o maior produtor e exportador de café.

Diante das exigências do mercado consumidor, os cafeicultores necessitam dar mais atenção às diversas etapas da produção tanto na condução da lavoura, quanto na colheita e pós-colheita, uma vez que os atributos físicos e sensoriais, influenciados por estes processos, são decisivos para a classificação dos cafés (ABRAHÃO *et al.*, 2010; PALACIN *et al.*, 2009).

A maior parte das lavouras cafeeiras brasileiras ficam localizadas em uma região onde existe um período do ano mais seco e com temperaturas mais baixas. O período de dormência das gemas florais, que pode estar associado a baixas temperaturas ou seca, é aparentemente necessário para que se completem eventos morfofisiológicos que permitam essas gemas responderem a estímulos externos e reassumir o crescimento (DAMATTA; RENA, 2000). Nas condições da maior parte das regiões produtoras de café no Brasil, observam-se a emissão de 2 a 3 floradas, concentradas no início do período chuvoso, entre os meses de agosto e novembro (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002).

O maior número de floradas é frequente na ausência de um período seco, fato comum nas regiões produtoras mais úmidas, ou sob irrigação permanente (DAMATTA; RENA, 2000). A ocorrência de chuvas, ao longo de todo o ano, como ocorre em países como Colômbia e Costa Rica, não permite que as gemas florais do cafeeiro experimentem um período de repouso

durante o seu desenvolvimento, o que é indispensável para que ocorra a floração sincronizada, em certa época do ano. Consequentemente, a colheita é mais difícil, tendo que ser realizada durante todo o ano, já que sempre existem frutos verdes em crescimento, concomitantemente com frutos em maturação, na mesma planta (NOBRE, 2009).

Com lavouras ocupando extensas áreas, no Brasil, as máquinas são indispensáveis para aumentar a capacidade operacional (COELHO *et al.*, 2015). Ademais, a colheita apenas dos frutos maduros se torna inviável diante do alto custo e da escassez de mão de obra observado no meio rural (PELEGRINI; SIMÕES, 2011).

Os principais métodos utilizados para o processamento do café são via seca e via úmida. 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 conhecido café em coco ou natural.

Via úmida 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). Um dos lotes provenientes da via úmida são os cafés verdes, pois estes na primeira passada pelo descascador são separados dos frutos maduros que são descascados primeiramente. Posteriormente, os frutos verdes podem ser secos em sua forma integral ou passados no descascador novamente, e como esse lote verde tem característica físico-químicas próprias deve-se ter um protocolo adequado de secagem.

A Instrução Normativa Nº 8 de 11 de junho de 2003 (BRASIL, 2003), oficializa um padrão brasileiro em que há a classificação em diferentes tipos de peneiras, defeitos e bebidas de grãos de café cru e beneficiados. Para a classificação faz-se a contagem de defeitos em uma amostra de 300 g de café beneficiado e utilizando a Tabela Brasileira de Classificação de Café por Tipo determina-se qual o tipo daquele café, de acordo com a quantidade de defeitos. Dentre os defeitos descritos na normativa, os mais graves quanto à qualidade da bebida são o preto, o verde e o ardido (PVA), os quais acontecem principalmente nas etapas de pós-colheita (BRASIL, 2003).

2.2 Secagem do café

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no grão por meio da 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 a pressão parcial de vapor d'água no ar de secagem (PABIS; JAYAS; CENKOWSKI, 1998).

Com a finalidade de estudar o efeito da temperatura de secagem na caracterização dos defeitos provenientes de frutos colhidos verdes, Teixeira *et al.* (1982) montaram três experimentos, sendo um em Conceição do Castelo (ES) e dois em Caratinga (MG). Dois deles foram montados com quatro tratamentos – o café colhido verde foi seco à sombra e em estufa, nas temperaturas 30 °C, 40 °C e 50 °C, em Castelo e 40 °C 50 °C e 60 °C, em Caratinga (estufa com ventilação forçada). Foi observado que, na secagem dos frutos colhidos verdes, em estufa, a 30 °C, ou à sombra, em terreiros, a quantidade de defeitos verde escuros ou preto-verdes encontrada foi insignificante (menor que 2,5%), com a maior parte dos grãos apresentando-se como verde-claros. Com a secagem em estufa a 40 °C a percentagem média dos grãos alterados aumentou para quase 18%, em Castelo e mais de 35%, em Caratinga. A 50 °C, a percentagem dos defeitos verde-escuros ou preto-verdes elevou-se para quase 44%, em Castelo e perto de 60%, em Caratinga, chegando à totalidade, quando a secagem foi feita a 60 °C. No segundo ensaio, entretanto, mesmo na secagem à sombra, a incidência de preto-verdes e verde-escuros atingiu 9%. Isto talvez se deva ao fato de, no final do processo, o café ter concluído a secagem, em terreiro, com 5 horas de sol e por ter a temperatura ambiente atingido níveis superiores a 30 °C. Pelos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se que o tipo do café também piorou, pois os cafés colhidos verdes, que apresentaram espermoderma verde-cana, foram classificados como verdes 5:1 (5 grãos verdes equivalem a 1 defeito), enquanto os verde-escuros ou preto-verdes foram classificados como ardidos 2:1 (2 grãos ardidos equivalem a 1 defeito). Na análise qualitativa, por meio da prova de xícara, os pesquisadores verificaram um gosto acentuado de verde para os cafés verde-cana e um gosto bastante desagradável para os cafés verde-escuros e preto-verdes.

Trabalhando com café cereja descascado, Ribeiro *et al.* (2003) observaram que, independentemente da temperatura do ar de secagem (40 °C, 45 °C 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 essa mudança no fluxo de ar não teve influência sobre a qualidade sensorial do café.

Borém *et al.* (2006) avaliando o efeito de diferentes temperaturas, fluxos de ar e períodos de pré-secagem em terreiro na qualidade do café cereja descascado (*Coffea arabica* L.) conduziu experimento onde o café foi submetido a dois tempos de pré-secagem, 1 e 3 dias de terreiro, após isso uma secagem em secadores experimentais com camada fixa, utilizando-se dois fluxos de ar (20 m³.min⁻¹.m⁻² e 30 m³.min⁻¹.m⁻²) e três temperaturas médias na massa de café (40, 45 e 50 °C). Os resultados indicam que o aumento do período de pré-secagem, a redução do fluxo de ar e da temperatura contribuem para a redução dos valores da condutividade elétrica e da lixiviação de potássio dos grãos de café; o teor de açúcares totais é reduzido significativamente com a elevação da temperatura de secagem somente para os cafés submetidos a 1 dia de pré-secagem.

Borém; Reinato e Andrade (2008) recomendam a temperatura de 35 °C para frutos verdes em secadores do tipo rotativo, quando esse é usado de forma complementar a uma pré-secagem inicial em terreiro. Essa pré-secagem deve ser feita espalhando os frutos em camadas finas, intercaladas com pequenas leiras de 3 cm, com revolvimento constante até que eles atinjam a meia seca, evitando-se que os frutos fiquem com a casca preta.

Borém *et al.* (2018) com o objetivo de avaliar os efeitos imediatos e latentes da temperatura do ar e da taxa de secagem na qualidade sensorial do café natural e sua relação com as características químicas e fisiológicas dos grãos, frutos maduros de café arábica foram colhidos e secos ao sol até atingirem a umidade de aproximadamente 35% (b.u.) e então transferidos para um secador mecânico, onde foram submetidos a diferentes condições de secagem, obtidas pela combinação entre três temperaturas de bulbo seco (Tbs), 35 °C, 40 °C e 45 °C e duas temperaturas de ponto de orvalho (Tpo), 2,6 °C e 16,2 °C. A análise dos dados indicou que, o aumento na taxa de secagem para as temperaturas de 35 °C e 40 °C tem efeito negativo na qualidade do café natural. Já para a temperatura de 45 °C, os efeitos da taxa de secagem na qualidade do café natural são sobrepostos pelos danos térmicos que predominam nessa temperatura. Notas sensoriais mais elevadas para o café estão associadas com valores mais baixos de condutividade elétrica, lixiviação de potássio e de ácidos graxos livres.

2.3 Colorimetria

As alterações na cor do café durante as etapas de pós-colheita são fortes indícios da ocorrência de processos oxidativos e transformações bioquímicas enzimáticas que alteram a composição dos precursores responsáveis pelo sabor e aroma da bebida, resultando em redução da qualidade. Cafés processados por via úmida possuem naturalmente coloração desejável verde azulada, distanciando-se da coloração indesejável vermelho-amarelo (ABREU *et al.*, 2015; BORÉM; RIBEIRO; *et al.*, 2013).

Fatores como danos sofridos pelo produto, luz, umidade relativa, teor de água, tempo de armazenagem e tipo de embalagem devem ser considerados quando se avalia as alterações de cor dos grãos de café (BORÉM; RIBEIRO; *et al.*, 2013; ISMAIL; ANUAR; SHAMSUDIN, 2013) e a manutenção desse parâmetro muitas vezes determinam a aceitação comercial (RIBEIRO *et al.*, 2011)

Também a cor dos grãos de café imaturos pode estar relacionada à qualidade da bebida e é um fator importante para a valorização do produto (ANDRADE *et al.*, 2019).

2.4 Aspectos ultraestruturais e qualidade do café

A retirada de água da semente, de forma inadequada, é a principal causa da ocorrência de danos em membranas. Em vários estudos, têm-se verificado que as membranas celulares são particularmente suscetíveis a danos estruturais durante o processo de secagem. Deficiências na integridade de membrana podem ser medidas pela lixiviação de eletrólitos da célula (PAULA *et al.*, 1993) ou visualizadas por meio da análise ultraestrutural.

Salazar *et al.* (1994) observaram que o manejo inadequado dos frutos de café nas fases pré e pós-colheita levam à degeneração das membranas e da parede celular, com a subsequente perda do controle da permeabilidade levando à deterioração mais rápida do grão.

Brandão Junior (2000) estudando a sensibilidade à dessecação em embriões de sementes de café, observou que as sementes colhidas no estágio verde apresentaram maiores danos ultraestruturais como coalescência de corpos de lipídios e provável ruptura do sistema de membrana em relação às sementes colhida no estágio verde-cana e maduro.

Borém; Marques e Alves (2008), trabalhando com café cereja descascado, avaliaram e compararam grãos de café que foram secados em temperatura do ar 40 °C, 50 °C e 60 °C e com fluxo de ar de 0,33 m³.s⁻¹.m⁻². Após a secagem foram realizados testes histoquímicos e microscopia eletrônica de varredura onde os resultados histoquímicos mostraram que na

secagem de 40 °C, não houve alteração na integridade celular da membrana plasmática e das vesículas. Entretanto no tratamento utilizando a temperatura do ar de secagem a 60 °C foram observados corpos oleosos fundidos que deram origem a grandes gotas no espaço intercelular, indicando uma ruptura das vesículas e da membrana plasmática. A microscopia eletrônica de varredura mostrou que, para os grãos secos a 40 °C, o conteúdo celular interno permanecia intacto e cheio de material celular e o espaço entre a membrana plasmática e a parede celular estava vazio. Porém, nos grãos secos a 60 °C, foi observada uma ruptura das células, representada por espaços intercelulares ocluídos, indicando um vazamento de parte do protoplasma.

Saath *et al.* (2010) estudando cafés obtidos pelos métodos natural e despulpado, analisou o efeito de diferentes métodos de secagem na manutenção da integridade da parede celular e da membrana plasmática. Os cafés foram submetidos a um período de pré-secagem em terreiro. Após este, uma parcela de cada tipo de café foi secada no terreiro e, outra, à temperatura de 40 °C e 60 °C em secadores de camada fixa. Durante a secagem em terreiro, a 40 °C e a 60 °C, antes de atingir 30% (b.u.) de teor de água, as membranas se mantiveram íntegras. O comprometimento da estrutura celular do endosperma ocorreu nos grãos com teor de água de 30% e 20% (b.u.).

Borém; Oliveira; *et al.* (2013) realizando experimento com dois tipos de processamento: via seca e via úmida; e quatro métodos de secagem: secagem em terreiro, e secagem mecânica com ar aquecido a 50/40 °C, 60/40 °C e 40/60 °C, onde a temperatura foi alterada quando os grãos de café atingiram 30% ± 2% (b.u.), com complementação da secagem até atingir 11% ± 1% (b.u.). A análise dos grãos de café em microscopia eletrônica de varredura mostrou que a temperatura de secagem de 50/40°C dos cafés despulpados apresentou resultados semelhantes aos cafés secados em terreiro, com pequena contração das células, sem sinais evidentes de ruptura. Pôde-se observar também que a utilização da temperatura de secagem 40/60 °C foi a que mais causou danos às estruturas das células, independentemente do tipo de processamento. Verificou-se que os cafés preparados por via seca apresentaram maior desestruturação dos componentes celulares do que os cafés despulpados, bem como maior tempo de exposição desses cafés ao processo de secagem.

2.5 Trigonelina, ácido clorogênico e cafeína

Os grãos pretos, verdes e ardidos, classificados como defeitos, são os que mais afetam a qualidade de bebida (OLIVEIRA *et al.*, 2006) e estes representam de 15 a 20% da produção

(ESQUIVEL; JIMÉNEZ, 2012). Alguns produtores vendem esses grãos a preços menores a indústrias de torrefação, faltando propostas de usos lucrativos, que incorporam os mesmos em misturas destinadas ao abastecimento do mercado interno, diminuindo assim, a qualidade da bebida comercializada nacionalmente (CRAIG; FRANCA; OLIVEIRA, 2012; FRANCA; OLIVEIRA, 2009)

Estudos científicos têm demonstrado que os compostos bioativos provenientes do extrato do grão do café cru, principalmente os ácidos clorogênicos, mas também a cafeína e a trigonelina, exibem inúmeras propriedades biológicas, incluindo efeitos antibacteriano, antioxidante, atividade anticarcinogênica e termogênica (KONO *et al.*, 1997; LIAO *et al.*, 2015; MENG *et al.*, 2013; REVUELTA-INIESTA; AL-DUJAILI, 2014; SHIMODA; SEKI; AITANI, 2006). Modulam o metabolismo da glicose e dos lipídios, tanto em indivíduos saudáveis como em portadores de distúrbios metabólicos (MUBARAK *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2011). Suas propriedades podem também ser exploradas em matrizes ex-vivo, tal como alimentos processados e óleos vegetais ricos em ácidos graxos insaturados, onde podem atuar como um antioxidante natural (BUDRYN *et al.*, 2015; BUDRYN; ZACZYŃSKA; ORACZ, 2016). Setores industriais como os farmacêuticos e alimentícios têm apresentado interesse na utilização desses compostos do café cru, devido a sua capacidade antioxidante já comprovada em diversos estudos (BOETTLER *et al.*, 2011; BUDRYN *et al.*, 2014; CARLSEN *et al.*, 2010; DAGLIA *et al.*, 2004; DZIKI *et al.*, 2015; GLEI *et al.*, 2006; SĘCZYK; ŚWIECA; GAWLIK-DZIKI, 2017; ŚWIECA *et al.*, 2017).

Além dos compostos fenólicos, outros metabólitos de importância tecnológica e biológica presentes no café são a cafeína, alcalóide pertencente ao grupo das xantinas com atividades farmacológicas reconhecidas cientificamente e outras metilxantinas, tal como, a teobromina, teofilina e trigonelina. Presente em alta concentração nos frutos do café, a trigonelina, uma N-metil betaína, é muito importante para o sabor e aroma do café, pois durante a torra do grão, esta molécula contribui com a formação de produtos de degradação que fornecem o aroma característico do café, dentre eles estão a piridina e o N-metilpirrol (MONTEIRO; TRUGO, 2005).

Torna-se importante o estudo proposto neste trabalho para a avaliação dos possíveis efeitos da secagem sobre a quantidade de compostos bioativos, pois como apresentado no trabalho de Prieto e Vázquez (2014) existem diferenças no conteúdo de ácidos clorogênicos, mas também na distribuição dos seus isômeros, de diferentes espécies de café, cultivadas em diferentes localizações e climas, e também a metodologia como esses compostos são extraídos dos grãos crus.

2.6 Modelagem matemática e simulação da secagem

O ajuste de modelos matemáticos para a secagem de produtos agrícolas permite a previsão do seu comportamento durante o processo de retirada de água e, assim, pode reduzir o tempo e os custos dessa etapa, e pode contribuir para o desenvolvimento de equipamentos para este fim (CORRÊA *et al.*, 2007; MARTINAZZO *et al.*, 2007; SIQUEIRA; RESENDE; CHAVES, 2013).

Os métodos que analisam a secagem dos produtos higroscópicos podem ser classificados em três: teóricos, empíricos ou semiempíricos.

Métodos empíricos e semiempíricos que tentam descrever o fenômeno da secagem consistem em formar grupos físicos adimensionais, que geralmente baseiam-se nas condições externas do produto, tais como temperatura e umidade relativa do ar de secagem; entretanto, não fornecem indicações sobre os mecanismos de transporte de água e energia no interior dos grãos. Baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, mas consideram que durante a secagem as condições são isotérmicas e que a transferência de umidade se restrinja à superfície do produto (ANDRADE; BORÉM, 2008).

Métodos teóricos além de considerar as condições externas da secagem, também levam em consideração mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos. A literatura cita alguns possíveis mecanismos de transporte de água em produtos capilares porosos, assim como os produtos de origem agrícola (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992):

- Fluxo hidrodinâmico;
- Movimentação de líquido e vapor por causa da diferença de pressão total;
- Causado por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- Movimento de vapor por causa das diferenças de temperatura – difusão térmica;
- Movimentação de vapor por causa do gradiente de pressão parcial de vapor – difusão de vapor;
- Movimentação de líquido por causa da difusão de água nas superfícies dos poros – difusão na superfície;
- Movimentação de líquido por causa do gradiente de concentração – difusão líquida;
- Movimentação de líquido por causa das forças superficiais – difusão capilar.

Os estudos de cinética de secagem de produtos agrícolas têm importância para auxiliar a seleção de temperaturas e tempos apropriados para um processo adequado que obtenha um produto final de melhor qualidade (AVHAD; MARCHETTI, 2016).

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, S. A. *et al.* Compostos bioativos e atividade antioxidante do café (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 414-420, 2010.
- ABREU, G. F. *et al.* Changes in the coffee grain color related to the post-harvest operations. **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 429-436, 2015.
- 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: Editora Ufla, 2008. v. 1, p. 301-347.
- ANDRADE, E. T. *et al.* Mathematical modelling and immediate and latent quality of natural immature coffee under different drying conditions. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 5, p. 630-638, 2019.
- AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 91, p. 76-87, 2016.
- BOETTLER, U. *et al.* Coffee constituents as modulators of Nrf2 nuclear translocation and ARE (EpRE)-dependent gene expression. **The Journal of Nutritional Biochemistry**, v. 22, n. 5, p. 426-440, 2011.
- BORÉM, F. M. Processamento do café. *In*: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. Lavras: Editora Ufla, 2008. v. 1, p. 127-158.
- BORÉM, F. M. *et al.* Quality of natural coffee dried under different temperatures and drying rates. **Coffee Science**, v. 13, n. 2, p. 159-167, 2018.
- BORÉM, F. M.; ISQUIERDO, E. P.; TAVEIRA, J. H. S. Coffee Processing. *In*: BORÉM, F. M. (Ed.). **Handbook of coffee post-harvest technology**. Georgia: Norcross, 2014. p. 49-68.
- BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 1, p. 62-66, 2008.
- BORÉM, F. M. *et al.* Scanning electron microscopy of coffee beans subjected to different forms of processing and drying. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 227-237, 2013.
- BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. *In*: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. 1 ed. Lavras: Editora Ufla, 2008. v. 1, p. 205-240.
- BORÉM, F. M. *et al.* Qualidade do café submetidos a diferentes temperaturas, fluxos de ar e período de pré-secagem. **Coffee Science**, v. v. 1, n. 1, p. 55-63, 2006.
- BORÉM, F. M. *et al.* Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. **Journal of Stored Products Research**, v. 52, p. 1-6, 2013.

BRANDÃO JUNIOR, D. D. S. **Marcadores da tolerância à dessecação de sementes de cafeeiro**. 2000. 155 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2000.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 8 de 11 de junho de 2003[café grão cru]** Brasília 2003. p. 1-15.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage Of Grains and Oilseeds**. Springer US, 1992. 450 p.

BUDRYN, G. *et al.* Properties of model systems of sunflower oil and green coffee extract after heat treatment and storage. **LWT - Food Science and Technology**, v. 59, n. 1, p. 467-478, 2014.

BUDRYN, G. *et al.* Effect of inclusion of hydroxycinnamic and chlorogenic acids from green coffee bean in β -cyclodextrin on their interactions with whey, egg white and soy protein isolates. **Food Chemistry**, v. 168, p. 276-287, 2015.

BUDRYN, G.; ZACZYŃSKA, D.; ORACZ, J. Effect of addition of green coffee extract and nanoencapsulated chlorogenic acids on aroma of different food products. **LWT - Food Science and Technology**, v. 73, p. 197-204, 2016.

CALDEIRA, L. G. *et al.* CAFÉ ARÁBICA DO BRASIL: o problema da imagem e a consequência no preço. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 15, n. 1, p. 717-726, 2017.

CARLSEN, M. H. *et al.* The total antioxidant content of more than 3100 foods, beverages, spices, herbs and supplements used worldwide. **Nutrition Journal**, v. 9, n. 1, p. 3, 2010.

COELHO, A. L. D. F. *et al.* Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 286-292, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de café v.8 safra 2021, n. 2 - Segundo Levantamento**, Brasília, 2021. p. 1-63.

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

CRAIG, A. P.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Discrimination between defective and non-defective roasted coffees by diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy. **LWT**, v. 47, n. 2, p. 505-511, 2012.

DAGLIA, M. *et al.* In Vitro and ex Vivo Antihydroxyl Radical Activity of Green and Roasted Coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 6, p. 1700-1704, 2004.

DAMATTA, F. M.; RENA, A. B. Relações hídricas no cafeeiro. *In*: I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2000, Poços de Caldas, MG. p. 1490.

DZIKI, D. *et al.* Ground green coffee beans as a functional food supplement – Preliminary study. **LWT - Food Science and Technology**, v. 63, n. 1, p. 691-699, 2015.

ESQUIVEL, P.; JIMÉNEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food Research International**, v. 46, n. 2, p. 488-495, 2012.

FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Coffee processing solid wastes: current uses and future perspectives. **Agricultural wastes**, v. 9, p. 155-189, 2009.

GLEI, M. *et al.* Bread Enriched With Green Coffee Extract Has Chemoprotective and Antigenotoxic Activities in Human Cells. **Nutrition and Cancer**, v. 56, n. 2, p. 182-192, 2006.

GUIMARÃES, J. R.; MENDES, A. N. G.; SOUZA, C. A. S. **Cafeicultura**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002. 317 p.

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

KONO, Y. *et al.* Antioxidant activity of polyphenolics in diets. Rate constants of reactions of chlorogenic acid and caffeic acid with reactive species of oxygen and nitrogen. **Biochimica et biophysica acta**, v. 1335, n. 3, p. 335-342, 1997.

LIAO, J. C. *et al.* Raf/ERK/Nrf2 signaling pathway and MMP-7 expression involvement in the trigonelline-mediated inhibition of hepatocarcinoma cell migration. **Food & Nutrition Research**, v. 59, n. 1, 2015.

MARTINAZZO, A. P. *et al.* Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 301-306, 2007.

MENG, S. *et al.* Roles of Chlorogenic Acid on Regulating Glucose and Lipids Metabolism: A Review. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2013, p. 11, 2013.

MESQUITA, C. M. D. *et al.* **Manual do café: colheita e preparo (Coffea arabica L.)**. Belo Horizonte, 2016. 52 p.

MONTEIRO, M. C.; TRUGO, L. C. Determinação de compostos bioativos em amostras comerciais de café torrado. **Química nova**, v. 28, p. 637-641, 2005.

MUBARAK, A. *et al.* Supplementation of a High-Fat Diet with Chlorogenic Acid Is Associated with Insulin Resistance and Hepatic Lipid Accumulation in Mice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 18, p. 4371-4378, 2013.

NOBRE, G. W. **Processamento e qualidade de frutos verdes de café arábica**. 2009. 85 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras 2009.

OLIVEIRA, L. S. *et al.* Proximate composition and fatty acids profile of green and roasted defective coffee beans. **LWT - Food Science and Technology**, v. 39, n. 3, p. 235-239, 2006.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain Drying: Theory and Practice**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

PALACIN, J. J. F. *et al.* Secagem combinada de café cereja descascado. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, v. 17, n. 3, 2009.

PAULA, M. *et al.* Electrical conductivity changes in deteriorated sunflower seeds. **Acta Horticulturae**, Leuven, Belgium, n. 362, p. 273-280, 1994. International Symposium on Seed [...], 1993, Bari, Italy.

PELEGRINI, D. F.; SIMÕES, J. C. Desempenho e problemas da cafeicultura no estado de Minas Gerais: 1934 a 2009. **Campo-Território: Revista de Geografia Agrária**, v. 6, n. 12, p. 183-199, 2011.

PRIETO, M. A.; VÁZQUEZ, J. A. In vitro determination of the lipophilic and hydrophilic antioxidant capacity of unroasted coffee bean extracts and their synergistic and antagonistic effects. **Food Research International**, v. 62, p. 1183-1196, 2014.

REVUELTA-INIESTA, R.; AL-DUJAILI, E. A. S. Consumption of Green Coffee Reduces Blood Pressure and Body Composition by Influencing β -HSD1 Enzyme Activity in Healthy Individuals: A Pilot Crossover Study Using Green and Black Coffee. **BioMed Research International**, v. 2014, 2014.

RIBEIRO, D. M. *et al.* Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento (Brasil)(Especial Café-no. 7)**, p. 94-107, 2003.

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

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

SALAZAR, M. R. *et al.* Estudio morfológico anatómico y ultraestructural del fruto de café *Coffea arabica* L. **Cenicafé** 45(3), p. 93-105, 1994.

SĘCZYK, Ł.; ŚWIECA, M.; GAWLIK-DZIKI, U. Soymilk enriched with green coffee phenolics – Antioxidant and nutritional properties in the light of phenolics-food matrix interactions. **Food Chemistry**, v. 223, p. 1-7, 2017.

SHIMODA, H.; SEKI, E.; AITANI, M. Inhibitory effect of green coffee bean extract on fat accumulation and body weight gain in mice. **BMC Complementary and Alternative Medicine**, v. 6, n. 1, p. 9, 2006.

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

ŚWIECA, M. *et al.* Wheat bread enriched with green coffee – In vitro bioaccessibility and bioavailability of phenolics and antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 221, p. 1451-1457, 2017.

TEIXEIRA, A. A. *et al.* Efeito da temperatura de secagem na caracterização dos defeitos provenientes de frutos colhidos verdes. *In: 10 Colloque Scientifique International sur le Café*, 1982, Salvador. Paris (Francia): ASIC, oct. 11-14. p. 73-80.

ZHANG, L. *et al.* Ionic Liquid-Based Ultrasound-Assisted Extraction of Chlorogenic Acid from *Lonicera japonica* Thunb. **Chromatographia**, v. 73, n. 1, p. 129-133, 2011.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 – ALTERAÇÕES ULTRAESTRUTURAIS DE FRUTOS VERDES DE CAFÉ SECADOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES CONTROLADAS DO AR DE SECAGEM

RESUMO

A colheita de café no Brasil é predominantemente não seletiva, pelo método de derriça completa, e pela desigualdade de maturação, acarreta uma grande porção de frutos verdes. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações na estrutura celular do endosperma dos grãos e a cinética de secagem dos frutos verdes de café, com o ajuste de modelos matemáticos aos valores experimentais. Os frutos verdes foram colhidos de forma manual e seletivamente e apresentaram em média o teor de água inicial de $2,50 \pm 0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.s.). A secagem foi realizada em um secador de camada fixa e as temperaturas usadas foram três temperaturas de bulbo seco (30 °C, 35 °C e 40 °C) em combinação de 4 temperaturas de ponto de orvalho (7,5 °C, 11,2 °C, 16,2 °C e 20,4 °C). O modelo de Andrade foi o que apresentou o melhor ajuste para representar a cinética de secagem, exceto nos tratamentos com Tbs de 40°C e Tpo de 7,5°C e Tpo de 11,2°C, que foram os modelos de Valcam e Midilli respectivamente. Analisando o endosperma dos grãos de café por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) verificou-se que ocorre danos nos grãos verdes com o aumento da temperatura de secagem e nos grãos pretos-verdes sua estrutura celular sempre está bem degradada independentemente do tratamento de secagem realizada.

Palavras – chave: *Coffea arabica* L.. Cafés imaturos. MEV. Modelagem matemática.

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de café é liderada pelo Brasil, seguido de Vietnã e Colômbia, sendo um produto agrícola de grande impacto na economia do país (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - ICO, 2021). A cafeicultura brasileira é composta, em sua maioria, pela espécie de *Coffea arabica* L., correspondendo a 81% da área plantada, tendo como estimativa de produção, em maio de 2021, de aproximadamente 34 milhões de sacas de 60 kg (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2021). A colheita de café no Brasil é predominantemente não seletiva, pelo método de derriça completa, pela extensão das áreas plantadas, sendo necessária utilização de máquinas para o aumento da capacidade operacional, tornando inviável a colheita de apenas os frutos maduros, diante do alto custo e escassez de mão de obra (CALDEIRA *et al.*, 2017; COELHO *et al.*, 2015). Assim, de acordo com a heterogeneidade quanto a maturação do produto colhido, e a fim de obter maior período de frutos maduros, é recomendada a colheita do café quando este apresenta, em média, no máximo 30% dos frutos verdes (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008).

A pós-colheita do café é caracterizada pelas etapas de processamento e secagem, que podem ser influenciadas pelos diferentes estádios de maturação em que foi colhido. Apesar de existirem técnicas para a separação dos frutos verdes, se o produtor não dispõe desses recursos, o percentual de frutos imaturos deve ser levado em consideração, para determinação do melhor método de secagem, visto que se este for mal conduzido, pode ocasionar alterações nas estruturas celulares dos grãos, comprometendo sua integridade e favorecendo os processos oxidativos (BORÉM *et al.*, 2013; REZENDE, 2013). Durante o processo de secagem, com a redução do teor de água nos frutos e grãos de café, ocorrem alterações em suas propriedades físicas, aerodinâmicas e qualidade do produto final (KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018). O conhecimento dessas características físicas e sua relação com o teor de água são de necessária importância uma vez que com essas informações é possível minimizar custos de produção, dimensionar e operar equipamentos de forma adequada e oferecer dados para melhorar a conservação do produto (RAMASHIA *et al.*, 2018).

A secagem do café, se mal conduzida, pode intensificar a degradação da estrutura celular dos grãos. Em estudos de secagem, os maiores danos nos sistemas de membranas ocorrem devido ao aumento da temperatura de secagem, e ao aumento da taxa de secagem promovido

por essas elevadas temperaturas, que podem causar perdas da qualidade do café em decorrência de danos na estrutura celular dos grãos, então análises ultraestruturais vem sendo realizados para avaliação dos efeitos das condições de secagem na qualidade do café (BORÉM; MARQUES; ALVES, 2008; BORÉM *et al.*, 2013; SAATH *et al.*, 2010).

Os métodos de secagem tradicionais não levam em consideração características particulares do material, nem da umidade relativa, temperatura e velocidade do ar para a representação da cinética de secagem. Assim a simulação matemática deste processo é fundamental para o desenvolvimento de equipamentos utilizados para a secagem de produtos agrícolas, por demonstrarem o comportamento da redução do teor de água do produto, permitindo a promoção de melhorias no sistema e a elaboração de novos equipamentos (ARAUJO *et al.*, 2017; GONELI *et al.*, 2014).

Dentre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem, o modelo da difusão é o mais intensamente investigado. A difusão em produtos agrícolas, durante a secagem, é um complexo processo, que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, capilar, na superfície, de vapor e térmica e o fluxo hidrodinâmico (GONELI *et al.*, 2014). Uma vez que os modelos baseados na segunda Lei de Fick, como o modelo da difusão, não são rigorosamente representativos para os diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água em produtos agrícolas, o coeficiente de difusão determinado é considerado aparente ou efetivo (ROCA *et al.*, 2008).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de secagem dos frutos verdes de café, com o ajuste de modelos matemáticos aos valores experimentais, determinar o coeficiente de difusão efetivo e as alterações na estrutura celular do endosperma dos grãos, dos diferentes tratamentos de secagem.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção, descrição da matéria-prima e teor de água

Foram utilizados frutos verdes de café (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí 62) colhidos de forma manual nos campos experimentais no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA)

O café foi colhido de forma manual e seletivamente, priorizando os frutos no estágio de maturação verde. Após colhidos, os cafés foram levados ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas da UFLA, onde promoveu-se a separação hidráulica, retirando-se dos frutos

colhidos aqueles chochos, mal granados, boias e passas, e posteriormente foram novamente selecionados para retirada do café verde-cana, tentando garantir que apenas os cafés verdes fossem encaminhados à secagem. Os cafés foram secados na sua integridade, realizando o processamento via seca que produz os cafés conhecidos como naturais.

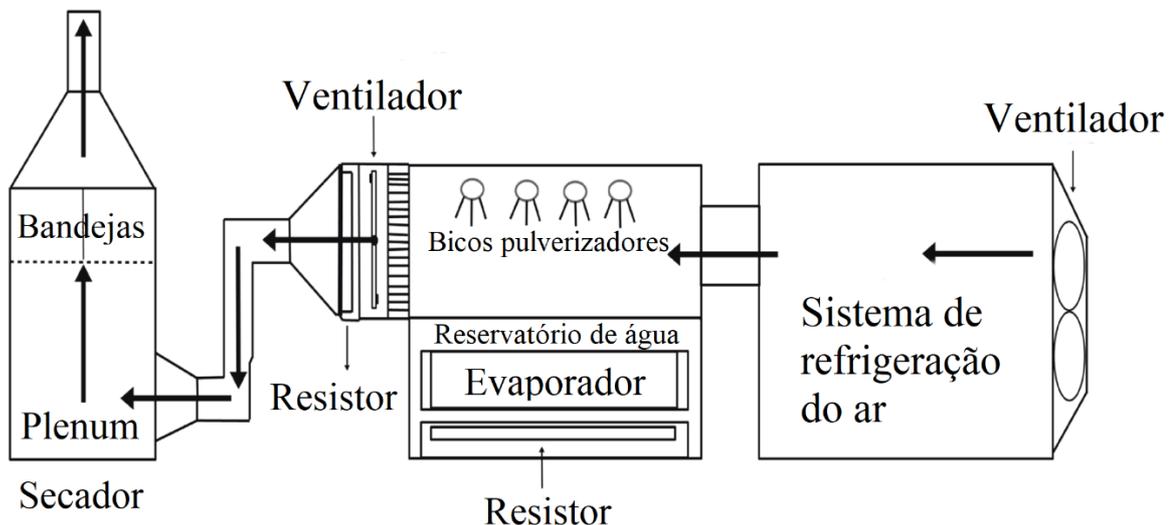
Para determinação do teor de água inicial dos frutos de café foi utilizado o método padrão de estufa, 105 °C, durante 24 horas de acordo com a Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Para verificar o teor de água final dos grãos de café, foi utilizado o método padrão de estufa a 105 °C, por 16 horas, conforme método padrão internacional da ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION -ISO, 2003).

Os frutos, no momento da colheita, apresentavam teor de água de $2,50 \pm 0,08 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.s.) e após a secagem mecânica eles atingiram o teor de água de $0,139 \pm 0,01 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.s.).

2.2 Sistema de secagem

O sistema para a secagem das amostras foi composto por unidade de condicionamento de ar acoplada a um secador de camada fixa (Figura 01).

Figura 1 - Sistema utilizado na secagem mecânica.



Fonte: Isquierdo *et al.* (2013).

O sistema de condicionamento de ar de laboratório (SCAL) foi utilizado para controlar as características do ar de secagem conforme modelo proposto por Fortes *et al.* (2006). Esse equipamento permite o controle do fluxo do ar, da temperatura de secagem e da temperatura da água que satura o ar dentro do SCAL. Em 6 (seis) tratamentos, o ar foi pré-condicionado antes

de entrar no SCAL, por um sistema de refrigeração composto por três unidades de ar condicionado em série. Onde os cafés são acondicionados para secar são compostos por quatro bandejas removíveis com fundo perfurado, de seção quadrada, com os quatro lados iguais de 0,3 m e profundidade de 0,1 m, elas estão em um mesmo nível e ficam localizadas, sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar. A temperatura do ar de secagem foi monitorada no plenum, e a temperatura da água dentro do SCAL, por termopares, tipo k, conectados a controladores universais marca Novus, modelo N1100. Um inversor de frequência marca Weg, modelo CFW-10 foi o controlador da rotação do ventilador centrífugo que insufla o ar aquecido no plenum, assim sendo, ele regulou o fluxo de ar.

2.3 Procedimento e delineamento experimental

Para acompanhamento da secagem foi utilizado o método gravimétrico, de perda de massa, até atingir o teor de água desejado. A perda de massa foi monitorada com o uso de uma balança analítica, com resolução de 0,01 g. As pesagens das amostras foram mais frequentes no início da secagem (de hora em hora, nas primeiras 6 horas) e com maiores espaçamentos ao longo do processo.

Foi feito um rodízio de 90° na posição das bandejas para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre elas.

Conhecendo-se a massa e teor de água inicial dos frutos de café, foi possível saber o teor de água no tempo t, a partir da equação 1:

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

em que,

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

M_{ai} : massa de água inicial (kg);

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

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

M_{ms} : massa de matéria seca (kg).

O fluxo de ar foi verificado por um anemômetro de pás, para uma velocidade constante durante a secagem de 0,33 m.s⁻¹, que corresponde a um fluxo de 20 m³min⁻¹m⁻², e a temperatura

do ar de secagem no plenum e a da água que satura o ar dentro do SCAL foram registradas a cada 10 minutos por datalogger modelo Testo 175T3, com dois termopares tipo T.

No total, foram realizados 12 tratamentos, em esquema fatorial 3x4, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo três temperaturas de bulbo seco (30 °C, 35 °C e 40 °C) e 4 temperaturas de ponto de orvalho (7,5 °C, 11,2 °C, 16,2 °C e 20,4 °C). Para cada tratamento foram realizadas 4 repetições. Essas combinações de temperaturas de bulbo seco (Tbs), com temperaturas de ponto de orvalho (Tpo) resultaram em diferentes umidades relativas (UR) do ar de secagem (Tabela 1).

Tabela 1 - Condições do ar de secagem dos 12 tratamentos de secagem resultantes das combinações de temperaturas de ponto de orvalho, temperaturas de bulbo seco e respectivas umidades relativas.

Tbs (°C)	Tpo (°C)	Umidade relativa (%)
30,0	7,5	24,4
	11,2	31,3
	16,2	43,4
	20,4	56,5
35,0	7,5	18,4
	11,2	23,6
	16,2	32,7
	20,4	42,6
40,0	7,5	14,1
	11,2	18,0
	16,2	24,9
	20,4	32,5

Fonte: Do autor (2021)

A temperatura de bulbo seco utilizada nesse experimento é a normalmente utilizada para frutos verdes de café (35 °C), e incluídas uma temperatura superior (40 °C) e outra inferior (30 °C). Quanto a temperatura de ponto de orvalho, normalmente, no período da colheita do café, entre os meses de maio e agosto, na região Sul de Minas, as temperaturas de bulbo seco e as umidades relativas médias situam-se, respectivamente, nas faixas de 16,5 °C e 71%, o que representa a uma temperatura e ponto de orvalho de aproximadamente, 11,2 °C. Na mesma época do ano, em regiões mais úmidas, como as Matas de Minas a correspondente temperatura de ponto de orvalho, equivaleria a 16,2 °C. Além dessas duas temperaturas de ponto de orvalho, foram incluídas uma inferior (7,5 °C) e uma superior (20,4 °C).

2.4 Coeficiente de difusão efetivo e taxa de secagem

O coeficiente de difusão efetivo foi determinado por meio do ajuste do modelo matemático baseado na teoria difusão líquida (Equação 2), aos dados experimentais da cinética de secagem do café verde, por meio de regressão não linear, utilizando-se o *software* STATISTICA 5.0® (Statsoft, Tulsa, USA). Essa equação é a solução analítica para segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica esférica, desconsiderando a contração volumétrica dos frutos e considerando a condição de contorno do teor de água na superfície do produto, descrita por BROOKER; BAKKER-ARKEMA e HALL (1992).

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

em que,

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

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

n: número de termos;

t: tempo (s).

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

Para a determinação do raio equivalente dos frutos de café, definido como o raio de uma esfera com o volume equivalente ao volume do fruto, durante a secagem mecânica foram medidas as dimensões principais de 15 frutos. Essas medidas foram realizadas com um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Esses 15 frutos foram mantidos separados dos outros em um saquinho com tecido tipo *voil*, mas no meio da massa de frutos, para secagem igual ao restante da amostra.

Considerando que os frutos de café são esferoides triaxiais, seu volume (V) foi calculado pela equação 3.

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

em que:

V – volume dos frutos (m³);

a – comprimento (m);

b – largura (m);

c – espessura (m)

Para avaliar a velocidade com que a água era evaporada, determinou-se a taxa de secagem média dos frutos de café verde, de acordo com a seguinte equação:

$$Tx. \text{ sec. med.} = \frac{U_{ini} - U_{fin}}{\Delta t} \quad (4)$$

em que:

Tx. sec. med. = taxa de secagem média (kg. kg⁻¹. h⁻¹);

U_{ini} = teor de água inicial (kg. kg⁻¹ (b.s.));

U_{fin} = teor de água final (kg. kg⁻¹ (b.s.));

Δt = intervalo de tempo (horas).

O coeficiente de difusão efetivo e a taxa de secagem média foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott a nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2013) com o pacote Easyanova (ARNHOLD, 2013).

2.5 Modelagem da secagem

Para descrever diferentes modelos de secagem é essencial conhecer a razão de umidade (RU), e esse parâmetro, durante a secagem, varia de 1 (teor de água inicial) a 0 (quando o produto atinge o teor de água de equilíbrio). A cada tempo da secagem experimental, conhece-se a razão de umidade correlacionando o teor de água do produto no tempo ao teor de água de equilíbrio e teor de água inicial, para condições específicas que ocorrem a secagem, tal como é demonstrado pela equação 5:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (5)$$

em que:

RU: razão de umidade do produto (adimensional);

U: teor de água do produto no tempo t (kg de água. kg de matéria seca⁻¹);

U_i : teor de água inicial do produto (kg de água. kg de matéria seca⁻¹);

U_e : teor de água de equilíbrio do produto (kg de água. kg de matéria seca⁻¹).

O teor de água de equilíbrio dos frutos foi calculado utilizando o modelo da equação 6 (LEMOS, 2018):

$$U_e = \exp(-2,65798 - (0,005699 * T) + (1,504139 * UR)) \quad (6)$$

em que,

U_e : Teor de água de equilíbrio higroscópico do produto (decimal, (b.s.));

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

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

Para todos os tratamentos, os dados de razão de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados aos modelos matemáticos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelos matemáticos aplicados nas curvas de secagem experimentais.

Modelo	Designação do modelo	Equação
Dois termos ¹	$RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(7)
Henderson & Pabis modificado ²	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(8)
Henderson & Pabis ³	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(9)
Midilli ⁴	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(10)
Newton ⁵	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(11)
Page ⁶	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(12)
Thompson ⁷	$RU = \exp((-a - (-a^2 + 4 \cdot b \cdot t)^{0,5}) \cdot (2 \cdot b)^{-1})$	(13)
Verma ⁸	$RU = -a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(14)
Wang & Sing ⁹	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(15)
Valcam ¹⁰	$RU = a + b \cdot t + c \cdot t^{1,5} + d \cdot t^2$	(16)
Exponencial de dois termos ¹¹	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$	(17)
Aproximação da difusão ¹²	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(18)
Andrade ¹³	$RU = (a \cdot \exp(k_0 \cdot t)^n) \cdot (b + \exp(k_1 \cdot t)^n)^{-1}$	(19)

¹Henderson (1974); ²Karathanos (1999); ³Henderson e Pabis (1961); ⁴Midilli; Kucuk e Yapar (2002); ⁵O'Callaghan; Menzies e Bailey (1971); ⁶Page (1949); ⁷Thompson; Peart e Foster (1968); ⁸Verma *et al.* (1985); ⁹Wang e Singh (1978); ¹⁰Siqueira; Resende e Chaves (2013); ¹¹Sharaf-Eldeen; Blaisdell e Hamdy (1980); ¹²Kassem (1998); ¹³Alves *et al.* (2020).

Fonte: Do autor (2021)

em que:

RU: razão de umidade (adimensional);

t: tempo de secagem (h);

k, k₀ e k₁: constantes de secagem;

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

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se do programa *Statistica 5.0*. A escolha do melhor modelo se baseou nos seguintes parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2), calculados por meio das equações (20, 21)

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y-\hat{Y})^2}{GL}} \quad (20)$$

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum \frac{|Y-\hat{Y}|}{Y} \quad (21)$$

em que, SE é o desvio padrão da estimativa (decimal), Y é o valor observado experimentalmente, \hat{Y} é o valor calculado pelo modelo, GL é o número de graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo), P é o erro médio relativo (%) e n é o número de dados observados.

2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A preparação e a observação das amostras por microscopia eletrônico de varredura foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME), localizado no Departamento de Fitopatologia/UFLA. Os tratamentos analisados foram os grãos verdes e pretos-verdes do tratamento 30 °C Tbs / 20,4 °C Tpo (154 horas de secagem); grãos verdes e pretos-verdes do tratamento 35 °C Tbs / 16,2 °C Tpo (108 horas de secagem) e grãos verdes e pretos-verdes do tratamento 40 °C Tbs / 7,5 °C Tpo (62 horas de secagem). Os frutos desses tratamentos foram descascados manualmente e imersos em solução fixativa (Karnovisk modificado), pH 7,2 e armazenadas em câmara fria, até a realização das análises. Em seguida, foram transferidos para líquido crioprotetor (glicerol 30%) por 30 minutos e cortados transversalmente em nitrogênio líquido. As secções obtidas foram transferidas para uma solução de tetróxido de ósmio 1% em água por 1 hora e, subsequentemente, desidratadas em série de acetona (25%, 50%, 75%, 90% e 100%, por três vezes) e depois levadas para o aparelho de secagem em ponto crítico. Os espécimes obtidos foram montados em suportes de alumínio “stubs”, utilizando fita de carbono colocada sobre uma película de papel alumínio, cobertos com ouro e observados em microscópio eletrônico de varredura LEO EVO 40 XVP. Foram

geradas e registradas digitalmente, a aumento fixo de 600 vezes, diversas imagens para cada amostra, nas condições de trabalho de 20 kV e distância de trabalho entre 6 e 8 mm.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 e 4 apresenta-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de temperatura de ponto de orvalho (Tpo), na taxa de secagem média e o coeficiente de difusão efetivo para os frutos verdes de café.

Tabela 3 - Taxa de secagem média ($\text{g. kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) dos frutos verdes, em função das diferentes temperaturas do ar de secagem de bulbo seco e ponto de orvalho.

Tbs (°C)	Tpo (°C)			
	7,5	11,2	16,2	20,4
30	18,262 cA	17,748 cB	16,266 cC	14,831 cD
35	26,522 bA	24,702 bB	21,756 bC	20,704 bD
40	38,177 aA	36,907 aB	34,568 aC	33,279 aD

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna e letras maiúsculas dentro da linha não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

Tabela 4 - Coeficiente de difusão efetivo $D_{eff} \times 10^{-11} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

Tbs (°C)	Tpo (°C)			
	7,5	11,2	16,2	20,4
30	0,506 cA	0,447 cB	0,426 cC	0,406 cD
35	0,663 bA	0,622 bB	0,603 bC	0,560 bD
40	0,889 aA	0,847 aB	0,814 aC	0,757 aD

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna e letras maiúsculas dentro da linha não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

De acordo com a Tabela 3 e 4 o incremento da temperatura de bulbo seco e diminuição da temperatura do ponto de orvalho do ar de secagem afetou diretamente a taxa de secagem média e o coeficiente de difusão efetivo dos frutos verdes de café. Para a taxa de secagem média, ocorreu variação, com as diferentes Tpo, para as Tbs de 30°C, 35°C e 40°C, respectivamente, 14,831 a 18,262 $\text{g. kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 20,704 a 26,522 $\text{g. kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 33,279 a 38,177 $\text{g. kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Para o coeficiente de difusão efetivo, ocorreu variação, com as diferentes Tpo, para as Tbs de 30°C, 35°C e 40°C, respectivamente, 0,406 a 0,506 $\times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 0,506 a 0,663 $\times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 0,757 a 0,889 $\times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Esses valores de coeficiente de difusão estão próximos dos encontrados por Nilnont *et al.* (2012), que encontraram um valor médio de 0,717 $\times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

¹. Também são próximos dos valores encontrados por Rios; Cardoso e Andrade (2021), que encontraram valores entre 0,551 a $1,323 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Botelho *et al.* (2018), afirmam que o aumento da temperatura do ar de secagem promove a elevação do potencial deste e da transferência de calor para o produto, fazendo com que a velocidade de formação e migração do vapor d'água do interior do grão para superfície e ambiente seja maior. Outro fator influenciado pela temperatura do ar de secagem é a viscosidade da água, já que com o aumento da temperatura a viscosidade desta é diminuída, ocasionando menor resistência no escoamento do fluido, facilitando a difusão das moléculas de água nos capilares do produto, como também aumentando a vibração destas, o que resulta na elevação da taxa de secagem (ALVES *et al.*, 2020; ARAUJO *et al.*, 2017; CORRÊA; GONELI; *et al.*, 2010; CORRÊA; OLIVEIRA; *et al.*, 2010; TOHIDI; SADEGHI; TORKI-HARCHEGANI, 2017)

A diminuição da umidade relativa do ar de secagem, com a finalidade de aumentar a taxa de secagem de café, tem tido resultados positivos em diversos trabalhos na literatura (ALVES *et al.*, 2013; AMARAL *et al.*, 2018; ISQUIERDO *et al.*, 2013). Apesar da umidade relativa do ar ser um dos fatores que pode influenciar a taxa de redução de água, esta ainda é afetada principalmente pela Tbs do ar de secagem (BURMESTER; EGGERS, 2010).

3.1 Modelagem matemática

Os parâmetros estatísticos, com os valores de coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P), resultantes dos ajustes aos dados experimentais das secagens, para os diferentes tratamentos de temperaturas do ar de secagem de bulbo seco e ponto de orvalho, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos, com os valores de coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P), resultantes dos ajustes aos dados experimentais das secagens.

Modelo	Parâmetros estatísticos	Tbs Tpo	30 °C			35 °C			40 °C					
			7,5 °C	11,2 °C	16,2 °C	20,3 °C	7,5 °C	11,2 °C	16,2 °C	20,3 °C	7,5 °C	11,2 °C	16,2 °C	20,3 °C
Dois termos	R^2 (%)		99,970	99,692	99,493	99,622	99,904	99,761	99,730	99,809	99,806	99,882	99,706	99,729
	P		3,927	17,207	24,367	33,748	6,748	11,613	13,987	16,395	9,836	8,970	19,816	15,256
	SE		0,005	0,017	0,022	0,019	0,010	0,016	0,017	0,014	0,014	0,011	0,018	0,017
Henderson & Pabis modificado	R^2 (%)		99,970	99,692	99,493	99,622	99,904	99,761	99,730	99,809	99,806	99,882	99,706	99,729
	P		3,927	17,207	24,373	33,772	6,748	11,613	13,987	16,395	9,836	8,970	19,816	15,256
	SE		0,005	0,017	0,023	0,020	0,010	0,016	0,017	0,014	0,015	0,012	0,019	0,018
Henderson & Pabis	R^2 (%)		99,970	99,692	99,493	99,622	99,904	99,761	99,730	99,809	99,806	99,882	99,706	99,729
	P		3,927	17,207	24,366	33,748	6,748	11,613	13,987	16,395	9,836	8,970	19,816	15,256
	SE		0,005	0,017	0,022	0,019	0,010	0,016	0,016	0,014	0,014	0,011	0,018	0,017
Midilli	R^2 (%)		99,985	99,965	99,948	99,953	99,982	99,965	99,962	99,977	99,976	99,993	99,948	99,974
	P		1,407	2,112	4,123	6,088	1,317	1,548	2,041	3,198	2,276	1,063	5,565	2,015
	SE		0,004	0,006	0,007	0,007	0,004	0,006	0,006	0,005	0,005	0,003	0,008	0,005
Newton	R^2 (%)		99,967	99,647	99,425	99,596	99,902	99,727	99,686	99,798	99,800	99,867	99,705	99,692
	P		3,441	19,350	27,024	36,025	6,984	13,124	15,863	17,421	10,214	9,730	20,146	16,719
	SE		0,005	0,018	0,023	0,019	0,010	0,016	0,017	0,014	0,014	0,011	0,017	0,018
Page	R^2 (%)		99,969	99,885	99,799	99,809	99,943	99,915	99,908	99,909	99,880	99,949	99,801	99,891
	P		2,564	7,996	12,411	20,173	3,627	4,145	4,973	9,145	6,466	5,451	13,103	8,230
	SE		0,005	0,010	0,014	0,013	0,007	0,009	0,010	0,009	0,011	0,007	0,014	0,011
Thompson	R^2 (%)		99,975	99,963	99,944	99,943	99,973	99,954	99,953	99,971	99,957	99,990	99,922	99,974
	P		0,982	1,314	3,479	1,725	0,749	3,716	4,273	0,899	1,908	1,467	2,317	0,744
	SE		0,005	0,006	0,007	0,007	0,005	0,007	0,007	0,005	0,006	0,003	0,009	0,005

(Continua)

(Tabela 5, Conclusão)

Modelo	Parâmetros estatísticos	Tbs	30 °C			35 °C			40 °C					
			Tpo	7,5 °C	11,2 °C	16,2 °C	20,3 °C	7,5 °C	11,2 °C	16,2 °C	20,3 °C	7,5 °C	11,2 °C	16,2 °C
Verma	R ² (%)		99,972	99,865	99,470	99,622	99,903	99,761	99,717	99,809	99,806	99,968	99,705	99,729
	P		3,897	8,729	25,255	33,748	6,831	11,613	14,566	16,395	9,836	3,445	20,213	15,256
	SE		0,005	0,011	0,022	0,019	0,010	0,016	0,017	0,014	0,014	0,006	0,018	0,017
Wang & Sing	R ² (%)		96,957	98,996	99,304	98,739	98,957	99,254	99,026	98,442	99,262	99,179	99,054	99,339
	P		47,950	29,724	28,764	56,252	20,805	23,007	31,983	50,555	15,372	18,798	27,429	21,372
	SE		0,050	0,030	0,025	0,034	0,032	0,028	0,031	0,039	0,027	0,029	0,032	0,026
Valcam	R ² (%)		99,981	99,958	99,961	99,968	99,980	99,946	99,938	99,968	99,993	99,985	99,986	99,969
	P		2,250	4,544	5,787	6,932	2,418	5,177	6,222	1,391	1,036	1,891	2,019	3,524
	SE		0,004	0,006	0,006	0,006	0,005	0,008	0,008	0,005	0,003	0,004	0,004	0,006
Exponencial de dois termos	R ² (%)		99,967	99,647	99,425	99,596	99,902	99,727	99,686	99,798	99,800	99,867	99,705	99,692
	P		3,441	19,350	27,024	36,025	6,984	13,124	15,863	17,421	10,214	9,730	20,146	16,719
	SE		0,005	0,018	0,023	0,019	0,010	0,017	0,018	0,014	0,014	0,012	0,018	0,018
Aproximação da difusão	R ² (%)		99,974	99,931	99,867	99,869	99,965	99,953	99,949	99,947	99,921	99,973	99,860	99,936
	P		1,336	6,082	10,464	16,930	2,113	2,140	2,891	6,600	4,956	4,020	10,252	6,309
	SE		0,005	0,008	0,011	0,011	0,006	0,007	0,007	0,007	0,009	0,005	0,012	0,008
Andrade	R ² (%)		99,996	99,993	99,987	99,988	99,998	99,994	99,993	99,995	99,992	99,990	99,991	99,991
	P		1,125	2,820	3,508	7,638	0,671	1,234	1,032	3,079	1,586	2,470	3,055	3,270
	SE		0,002	0,003	0,004	0,003	0,001	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003

Fonte: Do autor (2021)

De acordo com a literatura, para que um modelo matemático represente a cinética de secagem, é necessário que o coeficiente de determinação (R^2) seja superior à 90% e o erro médio relativo (P) inferior à 10% (MOHAPATRA; RAO, 2005; TEIXEIRA; ANDRADE; DA SILVA, 2012). Todos os modelos aplicados tiveram bons valores de R^2 para os 12 tratamentos de secagem, entretanto os que enquadraram dentro do limite máximo do erro médio relativo foram os modelos de Midilli, variando de 1,06% à 6,08, Thompson, de 0,74% à 4,27%, Valcam, de 1,03% à 6,93% e Andrade, de 0,67% à 7,63%. O modelo de Wang & Sing apresentou altos valores de P em todos os tratamentos de secagem, variando de 15,37% a 56,25%. Alguns estudos realizados quanto ao efeito de diferentes Tbs e Tpo na cinética de secagem do café natural, indicaram o modelo de Midilli com ajuste satisfatório aos dados experimentais (CORRÊA; OLIVEIRA; *et al.*, 2010; ISQUIERDO *et al.*, 2013). De acordo com a literatura, o modelo de Midilli teve o melhor ajuste na secagem de diferentes produtos agrícolas (ABANO *et al.*, 2011; ALVES, 2013; DA SILVA *et al.*, 2014; MELO *et al.*, 2015)

Apesar dos quatro modelos matemáticos citados anteriormente, terem coeficientes de determinação e erros médios relativos de acordo com o limite aceitável, a seleção dos modelos mais representativos aos ajustes da cinética de secagem, estão representados na Tabela 6, em que foi feita utilizando como critério de prioridade menores valores do desvio padrão da estimativa (SE), por evidenciar maior representatividade ao processo de secagem, menores valores de erro médio relativo (P), por este representar o desvio entre os valores experimentais relacionados à curva estimada pelo modelo (DRAPER; SMITH, 1998; KASHANINEJAD *et al.*, 2007; MOHAPATRA; RAO, 2005)

Tabela 6 - Coeficientes dos modelos que melhor se ajustaram.

Tbs (°C)	Tpo (°C)	Coeficientes do modelo de Andrade				
		a	b	k ₀	k ₁	N
30	7,5	2,4495	1,4531	0,0002	0,0542	0,7961
	11,2	0,9280	-0,0715	0,3432	0,3542	1,2153
	16,2	0,9029	-0,0913	0,2054	0,2123	1,3043
	20,4	0,8966	-0,1009	0,2225	0,2308	1,2766
35	7,5	0,9529	-0,0464	0,6136	0,6347	1,1215
	11,2	0,9483	-0,0515	0,6521	0,6675	1,1874
	16,2	0,9411	-0,0588	0,4736	0,4874	1,2058
	20,4	0,9371	-0,0606	0,4382	0,4538	1,1791
40	16,2	0,8960	-0,1009	0,4466	0,4644	1,2653
	20,4	0,9358	-0,0640	0,6279	0,6471	1,2144

(Continua)

(Tabela 6, Conclusão)

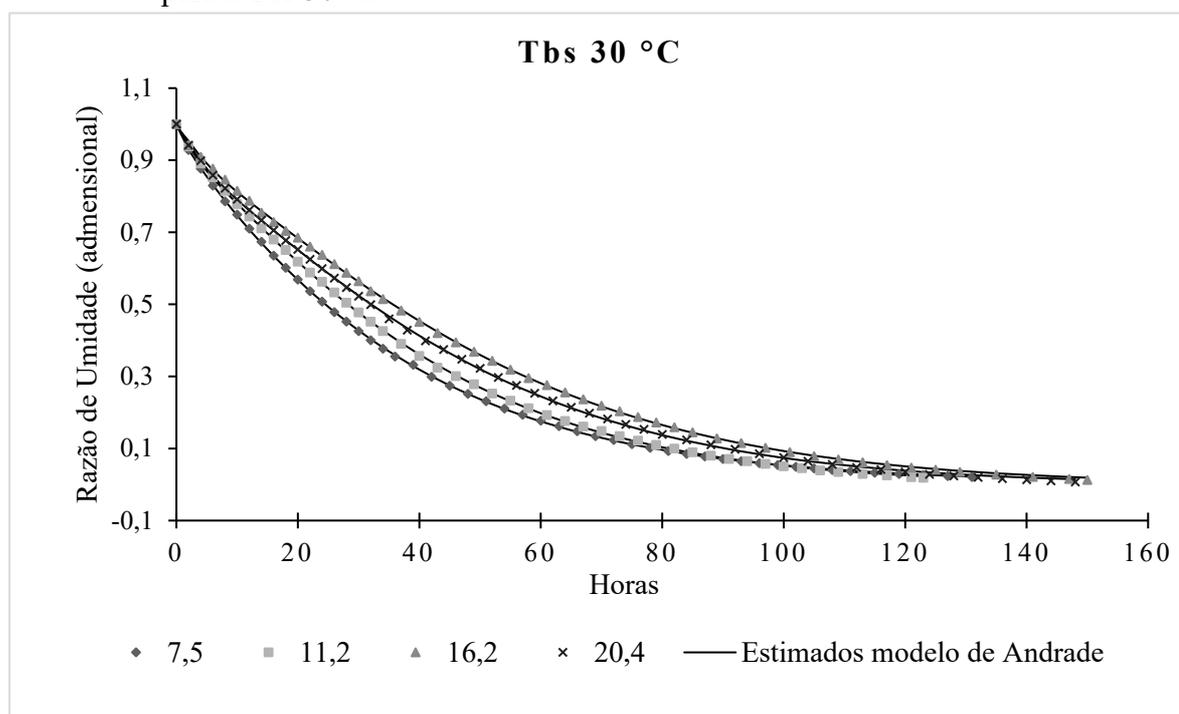
Tbs (°C)	Tpo (°C)	Coeficientes do modelo de Valcam			
		a	b	c	d
40 °C	7,5 °C	0,9965	-0,0535	0,0061	-0,0002

Tbs (°C)	Tpo (°C)	Coeficientes do modelo de Midilli			
		a	k	b	n
40	11,2	0,9930	0,0441	-0,0004	1,0295

Fonte: Do autor (2021)

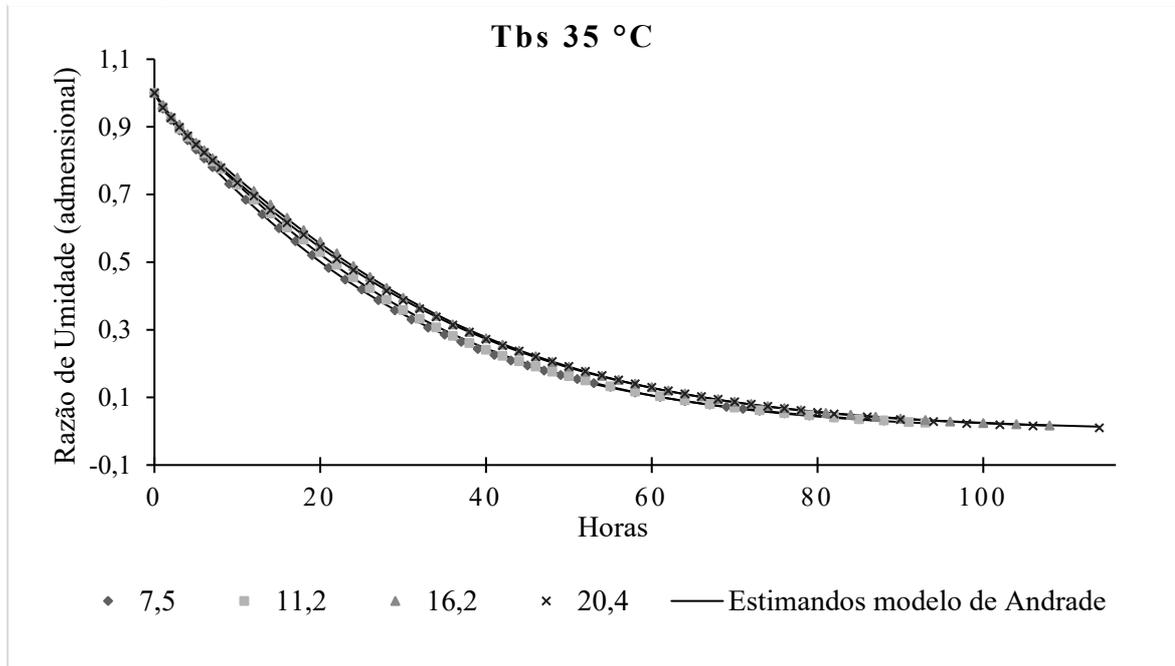
O modelo matemático de Andrade teve melhor ajuste em quase todos os tratamentos, com exceção do com Tbs de 40°C e Tpo de 7,5°C e Tpo de 11,2°C, os quais tiveram o mesmo SE para Valcam e Midilli, respectivamente, mas apresentaram menor P, sendo de 1,03% e 1,06%. As curvas de secagem em diferentes Tbs e Tpo, relacionadas aos valores simulados pelos modelos mais representativos, estão apresentadas nas Figuras de 2 à 6. A proximidade dos valores experimentais ajustados em relação à curva estimada pelo modelo, demonstram que este se adequou de forma significativa nos diferentes tratamentos de secagem.

Figura 2 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Andrade para a Tbs 30 °C



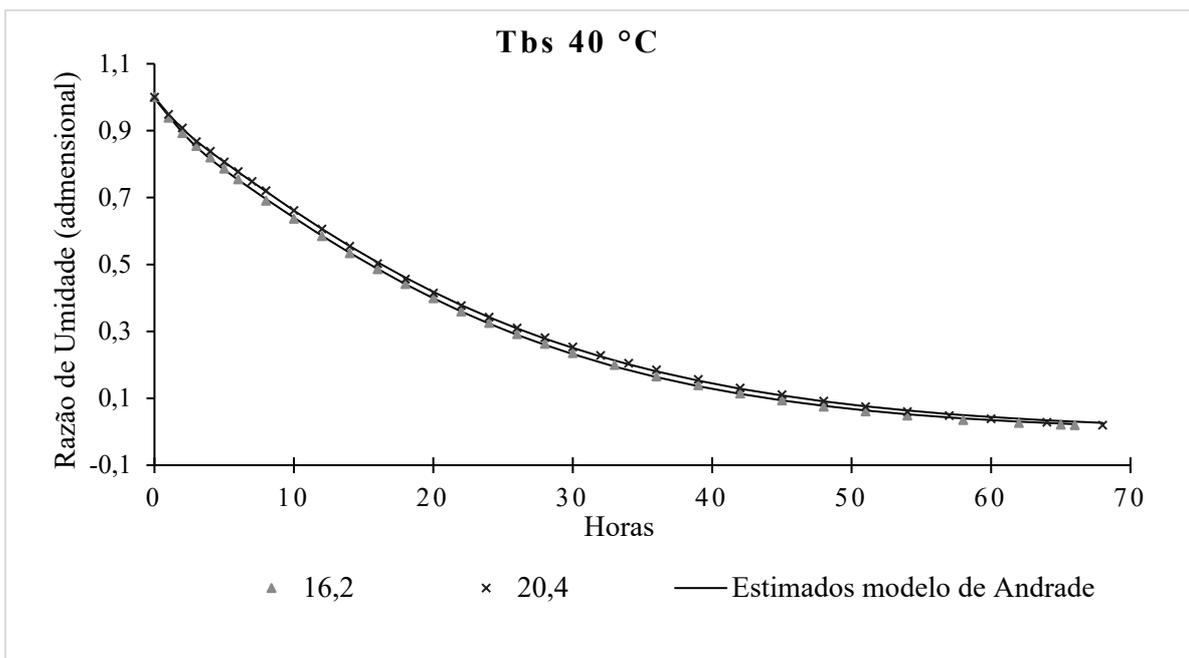
Fonte: Do autor (2021)

Figura 3 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Andrade para a T_{bs} 35 °C.



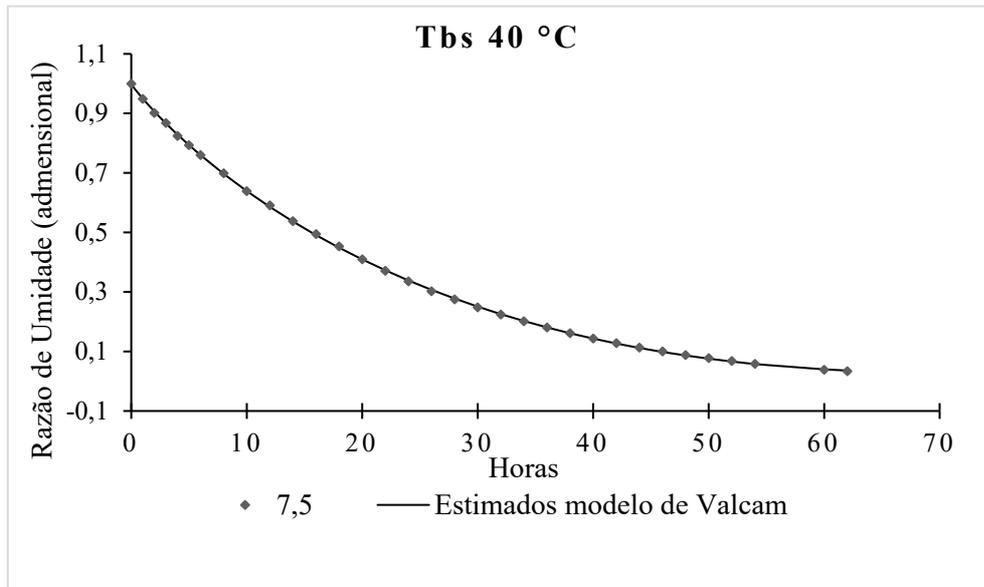
Fonte: Do autor (2021)

Figura 4 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Andrade para a T_{bs} 40 °C.



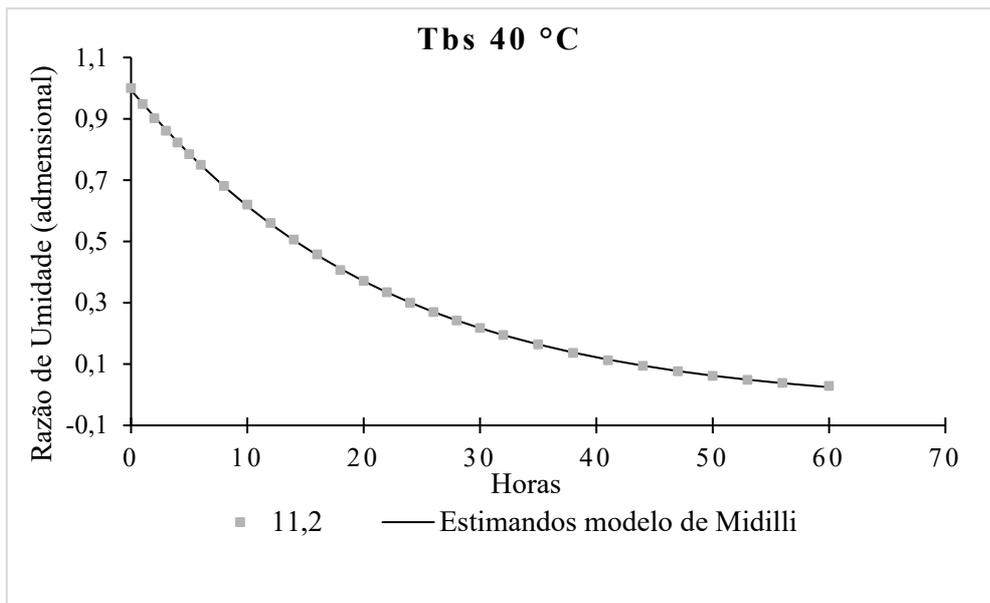
Fonte: Do autor (2021)

Figura 5 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Valcam para a Tbs 40 °C.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 6 - Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Midilli para a Tbs 40 °C.



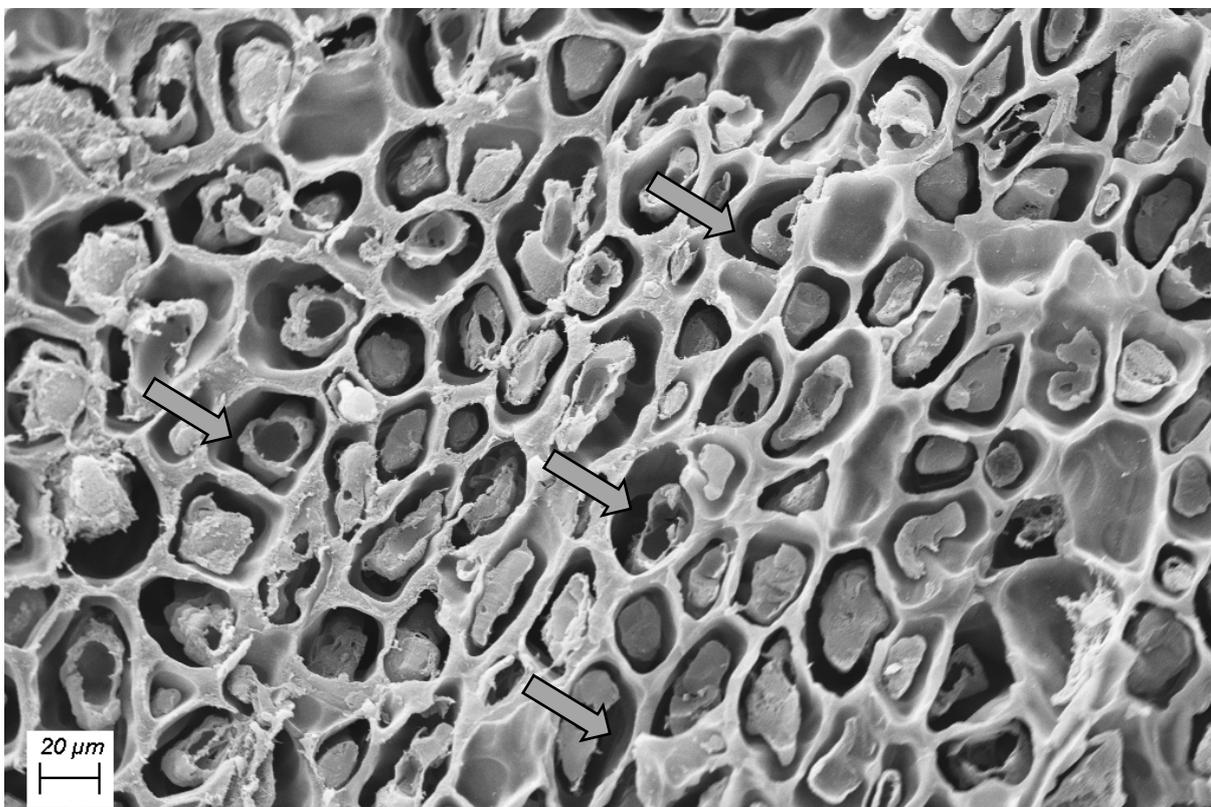
Fonte: Do autor (2021)

De acordo com as figuras pode-se observar a concordância entre os valores de RU observados durante a secagem e os valores estimados pelos modelos, confirmando o ajuste satisfatório para representar este fenômeno. Além disso, observou-se que a temperatura do ar de secagem de Tbs afetou significativamente a cinética de secagem, sendo que a de 40°C propiciou o menor tempo. Apesar de quanto mais rápida a secagem, mais econômica, as altas temperaturas podem degradar a estrutura celular do café, interferindo na integridade das membranas celulares, provocando perdas de qualidade do produto (ISQUIERDO *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013)

3.2 Microscopia eletrônica de varredura

As alterações provocadas pelos efeitos de secagem nas estruturas das células do endosperma do café verde e do preto-verde, com média de teor de água $0,139 \pm 0,01 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.s.), são observadas por meio da microscopia eletrônica de varredura e suas imagens digitais estão apresentados a seguir. A Figura 7, a seguir, são de grãos classificados como verdes por apresentarem a espermoderma aderida ao endosperma do grão de coloração verde em tons diversos. Esses grãos verdes tiveram o tratamento mais lento de secagem com as temperaturas de 30 °C de Tbs e 20,4 °C de Tpo, totalizando 154 horas de secagem. Apesar de ocorrência da contração do volume celular, a integridade da estrutura celular foi mantida, sem muitos sinais de extravasamento celular e rupturas, com espaço entre a membrana plasmática e a parede celular (lúmen), e intercelulares vazios, verificando que a secagem teve resultado satisfatório quanto a preservação da integridade das células. Verificou-se também uma maior presença de membranas plasmáticas com estrutura mais preservada.

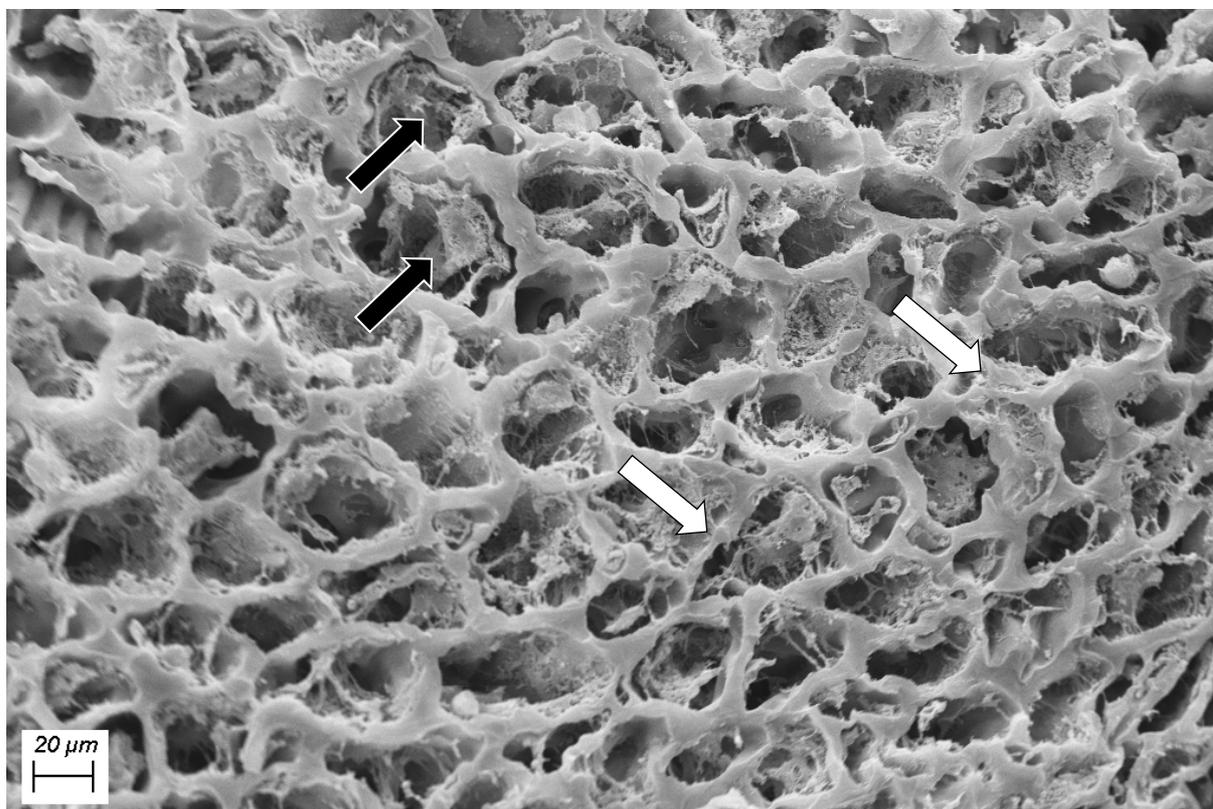
Figura 7 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes que tiveram o tratamento de secagem de 30 °C de Tbs e 20,4 °C de Tpo (154 horas de secagem). Setas na cor cinza indicam o lúmen vazio.



Fonte: Do autor (2021)

A Figura 8, a seguir, são do endosperma de grãos classificados como pretos-verdes por apresentarem uma espermoderma aderida ao endosperma de coloração preta. Esses grãos pretos-verdes apesar de também serem do tratamento e secagem 30 °C de Tbs e 20,4 °C de Tpo (154 horas de secagem), a estrutura celular do seu endosperma está corrompida e suas membranas plasmáticas degradadas.

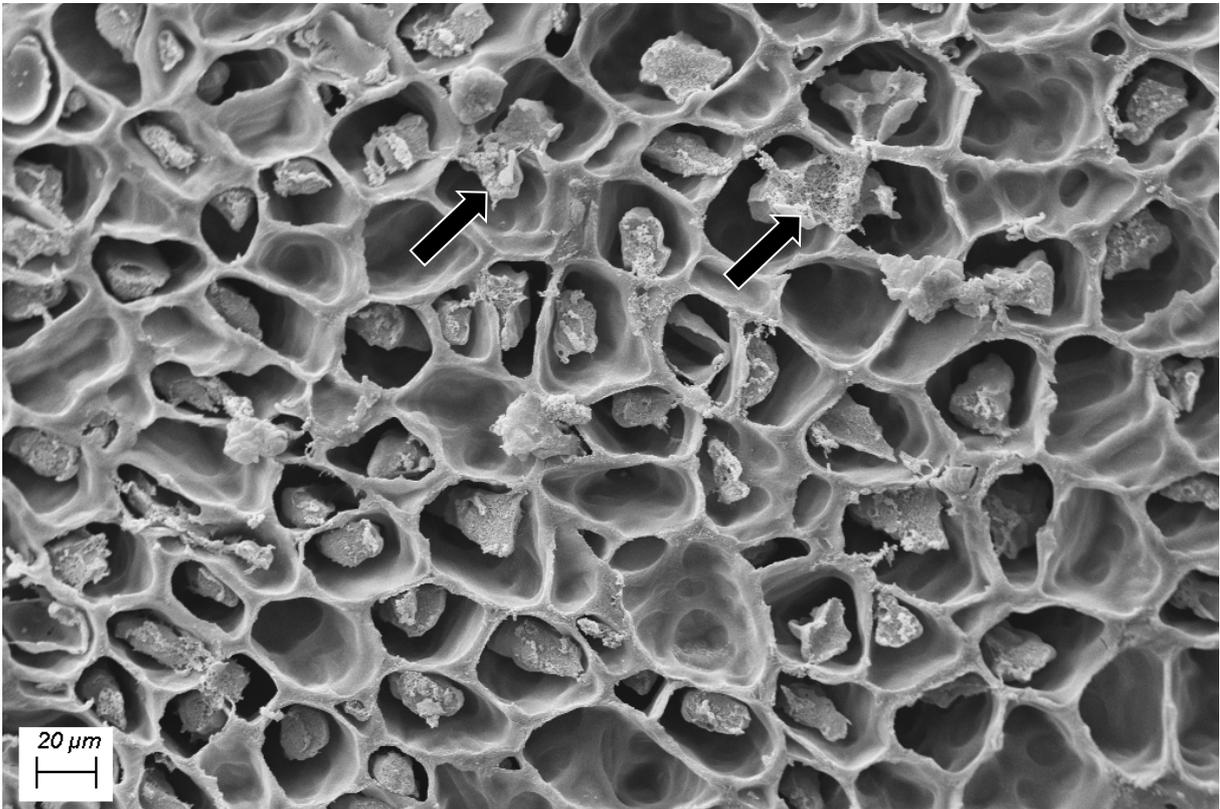
Figura 8 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos pretos-verdes que tiveram o tratamento de secagem de 30 °C Tbs / 20,4 °C Tpo (154 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.



Fonte: Do autor (2021)

A Figura 9, a seguir, é uma eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes que tiveram um tratamento de secagem intermediário de tempo, com temperaturas 35 °C de Tbs e 16,2 °C de Tpo, de 108 horas de secagem. Nessa figura 4 apesar de uma menor quantidade de membranas plasmáticas em comparação a secagem mais lenta, ainda pode-se encontrar uma integridade de sua estrutura celular.

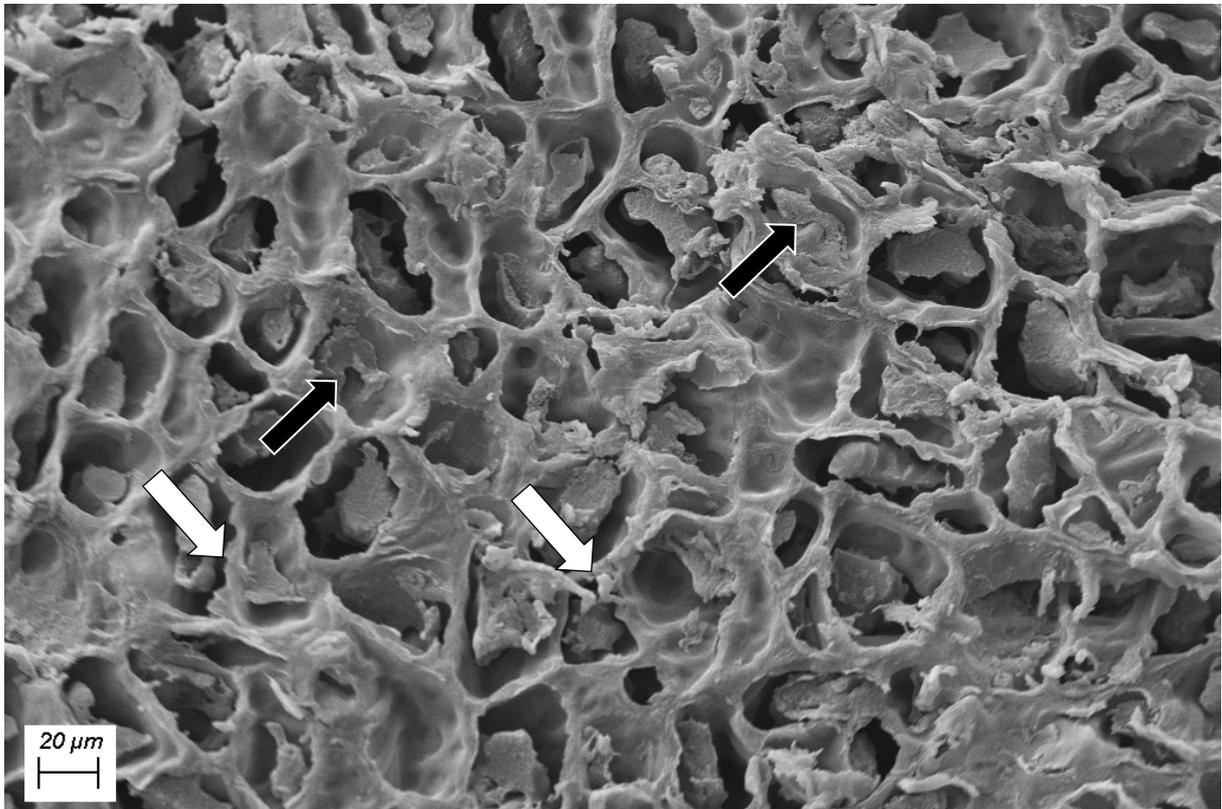
Figura 9 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes do tratamento de secagem 35 °C Tbs / 16,2 °C Tpo (108 horas de secagem). Setas pretas indicam membranas plasmáticas mais degradadas e em menor quantidade.



Fonte: Do autor (2021)

A Figura 10, a seguir, corresponde ao grão classificado como preto-verde que teve um tratamento de secagem intermediário de tempo, com temperaturas 35 °C de Tbs e 16,2 °C de Tpo (108 horas de secagem). Também nesse tratamento de secagem, a estruturas celulares desses grãos pretos-verdes apresentam-se corrompidas e suas membranas plasmáticas degradadas.

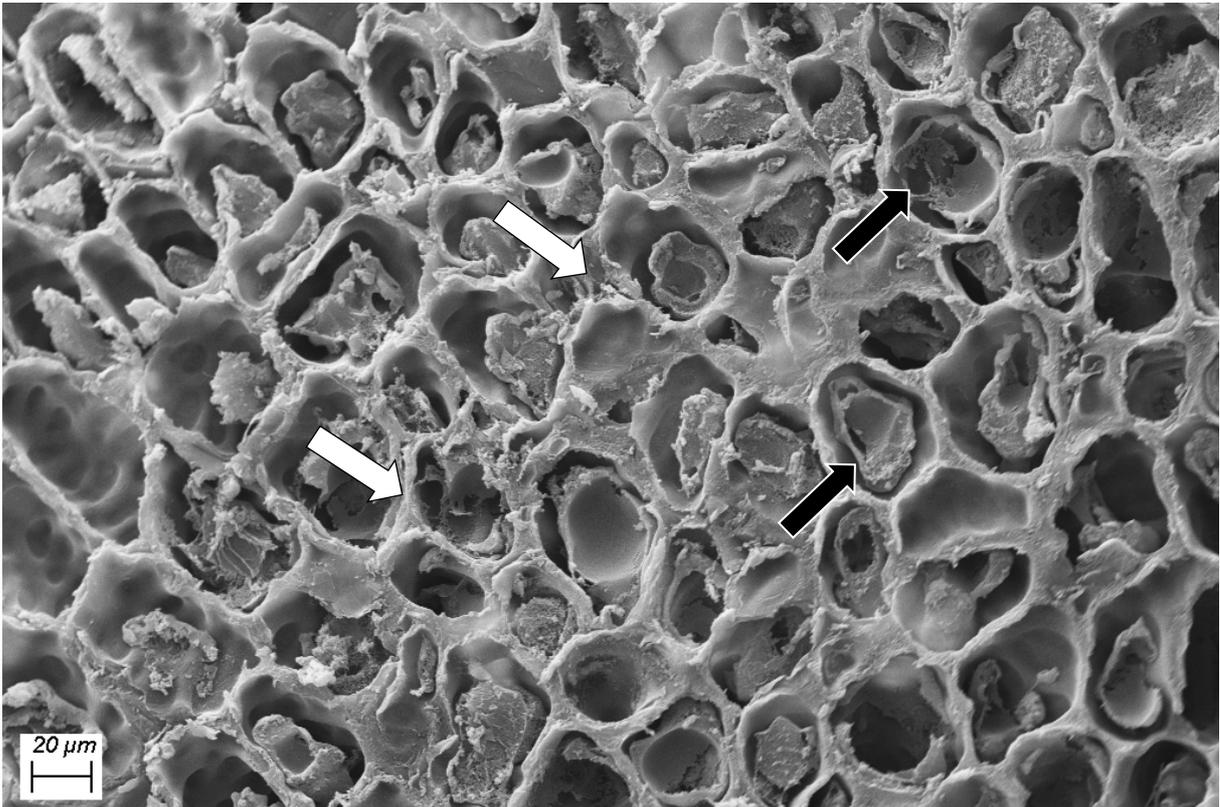
Figura 10 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos pretos-verdes do tratamento de secagem 35 °C Tbs / 16,2 °C Tpo (108 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.



Fonte: Do autor (2021)

A Figura 11, a seguir, é uma eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes que tiveram um tratamento de secagem mais rápida no tempo, com temperaturas de 40 °C de Tbs e 7,5 °C de Tpo com tempo de secagem de 62 horas. A estrutura celular desses grãos verdes também mostram desorganização de paredes celulares e degradação das membranas plasmáticas.

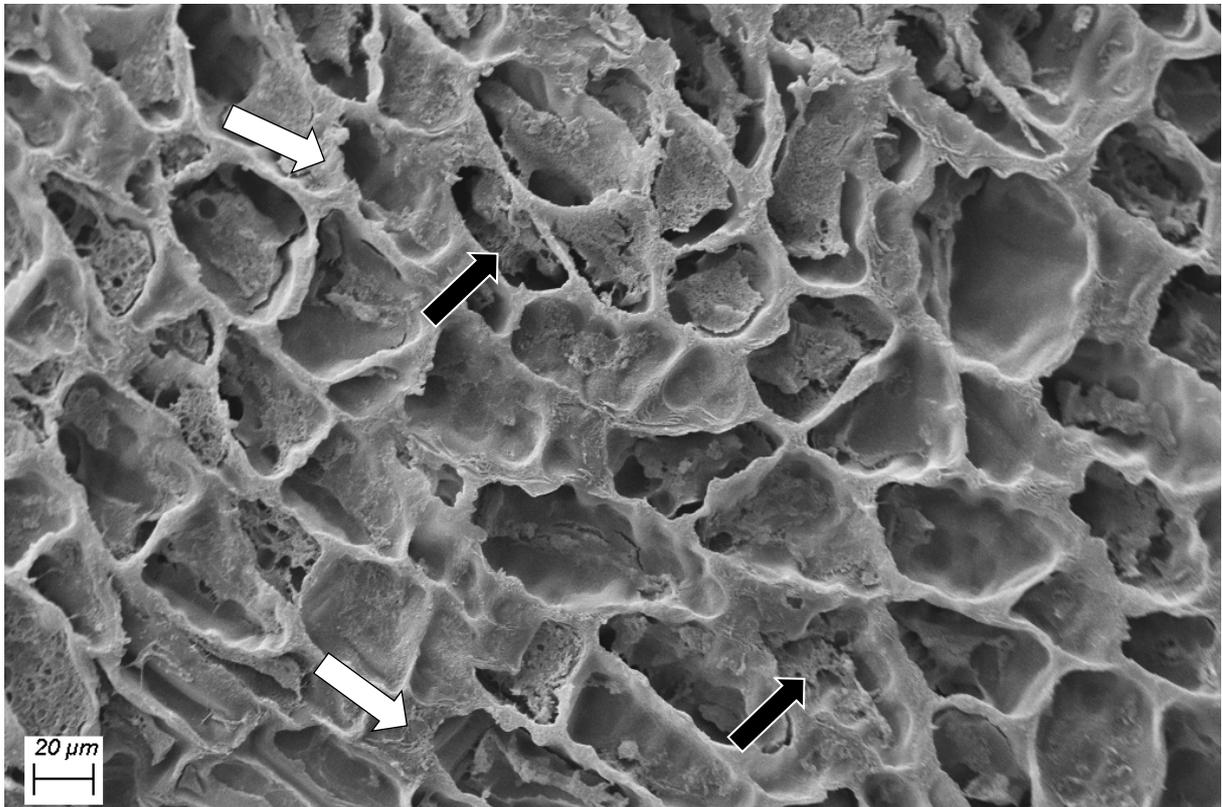
Figura 11 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos verdes do tratamento de secagem 40 °C Tbs / 7,5 °C Tpo (62 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.



Fonte: Do autor (2021)

A Figura 12, a seguir, é uma eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos pretos-verdes que tiveram um tratamento de secagem mais rápido no tempo, com temperaturas de 40 °C de Tbs e 7,5 °C de Tpo, com tempo de secagem de 62 horas. Assim como nos tratamentos mais lento e intermediário o endosperma deste grão preto-verde também se apresenta com sua estrutura celular bem degradada e membranas plasmáticas bem corrompidas. Segundo Saath *et al.* (2010), a saída da água durante a secagem, induz a parede celular à contração podendo causar sua desestruturação, como também reduzindo o volume celular, aglomerando os componentes citoplasmáticos.

Figura 12 - Eletromicrografia de varredura do endosperma de grãos pretos-verdes do tratamento de secagem 40 °C Tbs / 7,5 °C Tpo (62 horas de secagem). Setas na cor branca representam desestruturação da parede celular, e pretas as membranas plasmáticas degradadas.



Fonte: Do autor (2021)

Illy; Brumen e Mastropasqua (1982) realizando estudos sobre as características de refletância dos grãos defeituosos, pretendendo sua retirada dos lotes de café através da seleção eletrônica pela cor, observaram as características da superfície e das células dos grãos defeituosos, verificando que a desorganização celular aumenta dos grãos verdes para os ardidos e destes para os preto-verdes.

Brandão Junior; Vieira e Hilhorst (2002) ao fazerem análises ultraestruturais em células de semente de café, quando colhidos no estágio verde, observaram que essas apresentavam intensas alterações, como formações de cristais nos espaços intercelulares (indicativo da perda da integridade de membrana), desaparecimento do vacúolo e endomembranas e coalescência de lipídios.

Illy e Viani (2005) relatam que as paredes celulares dos grãos verdes são mais finas quando comparadas com grãos maduros, com um menor conteúdo de celulose, e reduzida quantidade de sacarose e lipídios.

Como a parede celular e membranas dos grãos provenientes de frutos colhidos verdes ainda não estão totalmente formadas, a sua degradação parece ser mais fácil.

Estudos têm mostrado que o aumento de temperatura (acima de 40 °C) com consequência do aumento da taxa de secagem provoca a degradação da parede e das membranas celulares do endosperma de grãos de café (BORÉM *et al.*, 2013; SAATH *et al.*, 2010). A maior manutenção da integridade das paredes celulares neste estudo, ocorreu no tratamento de secagem de 30 °C de Tbs e 20,4 °C de Tpo, e um tempo 154 horas de secagem, sendo o de menor temperatura de bulbo seco, visto que maiores temperaturas de bulbo seco no período de velocidade decrescente de secagem, a temperatura dos grãos aumentam, pôr a taxa interna de transporte de água ser menor que a evaporação superficial, e a transferências de calor do ar para o produto não ser compensada, fazendo com que temperaturas do ar de secagem mais altas causem maiores riscos de perda de qualidade por danos térmicos, como rupturas e extravasamentos celulares (BORÉM; ISQUIERDO; TAVEIRA, 2014; BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008)

4.CONCLUSÕES

Para as condições de secagem testadas no presente estudo, para frutos verdes de café, na maior parte dos tratamentos, o modelo de Andrade foi que apresentou o melhor ajuste para representar a cinética de secagem, exceto nos tratamentos com Tbs de 40°C e Tpo de 7,5°C e Tpo de 11,2°C, que foram os modelos de Valcam e Midilli, respectivamente.

A temperatura de secagem teve interferência na resistência e predisposição estrutural da parede e membranas celulares do endosperma. A degradação da parede e membrana celular é mais acentuada com o aumento da temperatura no grão de café classificado como verde, o que não se observa no grão classificado como preto-verde onde em todos os tratamentos uma estrutura celular toda desorganizada e com membranas celulares bem degradadas.

Para a manutenção da integridade celular a temperatura de secagem ideal foi de 30 °C, com taxa de secagem média entre 14,831 a 18,262 g. kg⁻¹. h⁻¹; e de coeficiente de difusão entre 0,406 a 0,506 x 10⁻¹¹ m².s⁻¹.

REFERÊNCIAS

- ABANO, E. E. *et al.* Modeling pre-treatments effect on drying kinetics of garlic (*Allium sativum* L.) slices in a convective hot air dryer. **African Journal of Food Science**, v. 5, n. 7, p. 425-435, 2011.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.
- ALVES, G. *et al.* Influence of different temperatures and airflows on drying of natural and pulped coffee. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 192-200, 2020.
- ALVES, G. E. **Cinética de secagem e qualidade do café para diferentes temperaturas e fluxos de ar**. 2013. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - UFLA, Lavras - MG. 2013.
- ALVES, G. E. *et al.* Drying kinetics of natural coffee for different temperatures and low relative humidity. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 238-247, 2013.
- AMARAL, R. *et al.* SIMULATION OF COFFEE FRUIT DRYING USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. **Coffee Science**, v. 13, n. 4, p. 477-488, 2018.
- ARAÚJO, W. D. *et al.* Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.
- ARNHOLD, E. Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v. 50, n. 6, p. 488-492, 2013.
- BORÉM, F. M.; ISQUIERDO, E. P.; TAVEIRA, J. H. S. Coffee Processing. *In*: BORÉM, F. M. (Ed.). **Handbook of coffee post-harvest technology**. Georgia: Norcross, 2014. p. 49-68.
- BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 1, p. 62-66, 2008.
- BORÉM, F. M. *et al.* Scanning electron microscopy of coffee beans subjected to different forms of processing and drying. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 227-237, 2013.
- BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. *In*: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. 1 ed. Lavras: Editora Ufla, 2008. v. 1, p. 205-240.
- BOTELHO, F. M. *et al.* Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, v. 26, n. 1, p. 13-25, 2018.

BRANDÃO JUNIOR, D. D. S.; VIEIRA, M. D. G. G. C.; HILHORST, H. W. M. Aquisição da tolerância à dessecação nos diferentes estádios de desenvolvimento de sementes de cafeeiro. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 26, n. 4, p. 673-681, 2002.

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**. Springer US, 1992. 450 p.

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

CALDEIRA, L. G. *et al.* CAFÉ ARÁBICA DO BRASIL: o problema da imagem e a consequência no preço. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 15, n. 1, p. 717-726, 2017.

COELHO, A. L. D. F. *et al.* Determinação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas do sistema fruto-pedúnculo-ramo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 286-292, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de café v.8 safra 2021, n. 2 - Segundo Levantamento**, Brasília, 2021. p. 1-63.

CORRÊA, P. C. *et al.* Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 10, p. 2016-2022, 2010.

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

DA SILVA, W. P. *et al.* Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 1, p. 67-74, 2014.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 0471170828.

FORTES, M. *et al.* Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 578-589, 2006.

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

HENDERSON, S. M. Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 6, p. 1167-1168, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory: Temperature effect on drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 39, p. 37-44, 1961.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the science of quality**. 2 ed. Academic Press, 2005. 416 p.

ILLY, E.; BRUMEN, G.; MASTROPASQUA, L. M., W.S. Study on the characteristics and the industrial sorting of defective beans in green coffee lots. *In*: 10 Colloque Scientifique International sur le Café, 1982, Salvador. Paris (Francia): ASIC, oct. 11-14. p. 99-128.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - ICO. Trade Statistics Tables. Coffee production by exporting countries. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION -ISO. **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**, v. 56, n. 3, p. 995, 2013.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, 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**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KASSEM, A. S. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. *In*: 13th international congress on agricultural engineering, 1998, Morocco: p. 2-6.

KHODABAKHSHIAN, R. *et al.* Aerodynamic separation and cleaning of pomegranate arils from rind and white segments (locular septa). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 1, p. 61-68, 2018.

LEMOS, I. A. **Determinação da qualidade imediata e latente de café secado com baixas umidades relativas do ar**. 2018. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG. 2018.

MELO, J. C. S. *et al.* Estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 2, p. 09-14, 2015.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, 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**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

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

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

OLIVEIRA, P. D. *et al.* Physiological aspects of coffee beans, processed and dried through different methods, associated with sensory quality. **Coffee Science** v. 8, n. 2, p. 211-220, 2013.

PAGE, G. E. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers**. 1949. 46 p. Dissertação (Mestrado - Engenharia mecânica) - Purdue University, West Lafayette, IN - USA. 1949.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2013.

RAMASHIA, S. E. *et al.* Some physical and functional properties of finger millet (*Eleusine coracana*) obtained in sub-Saharan Africa. **Food Research International**, v. 104, p. 110-118, 2018.

REZENDE, J. E. Série Tecnológica Cafeicultura. Defeitos do café. : EMATER - MG: 6 p. 2013.

RIOS, P. D. A.; CARDOSO, D. B.; ANDRADE, E. T. Origin of black-green defect in the artificial drying of immature coffees. **Coffee Science**, v. 16, p. e161884, 2021.

ROCA, E. *et al.* Effective moisture diffusivity modelling versus food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**, v. 106, n. 4, p. 1428-1437, 2008.

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

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. A Model for Ear Corn Drying. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 5, p. 1261-1265, 1980.

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

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T.; DA SILVA, P. G. L. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi. **Engevista**, v. 14, n. 2, 2012.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Model. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.

TOHIDI, M.; SADEGHI, M.; TORKI-HARCHEGANI, M. Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 519-528, 2017.

VERMA, L. R. *et al.* Effects of Drying Air Parameters on Rice Drying Models. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 1, p. 296-301, 1985.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **A single layer drying equation for rough rice**. ASAE paper no. 78-3001. Saint Joseph, Michigan, USA. 1978.

ARTIGO 2 - QUALIDADE DE FRUTOS VERDES DE CAFÉ SECOS EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE BULBO SECO E TEMPERATURAS DE PONTO DE ORVALHO

RESUMO

Conforme as características mais comuns da colheita de café do Brasil, existe uma quantidade significativa de frutos verdes. Uma das principais etapas do processo de pós-colheita é a secagem, e essa deve ser bem estabelecida para esse tipo de fruto, por serem mais sensíveis a essa etapa do processamento. As condições utilizadas durante a secagem de frutos verdes de café, como a temperatura e umidade relativa do ar, podem contribuir para o aumento de defeitos preto-verde nos grãos. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito da secagem com diferentes temperaturas de bulbo seco (Tbs) e temperatura de ponto de orvalho (Tpo) na qualidade dos frutos verdes de café. Os frutos verdes foram colhidos de forma manual e secados de forma contínua até um teor de água médio de 0,139 base seca (b.s.). A secagem foi realizada em um secador de camada fixa acoplado a um sistema de ar condicionado composto no qual o ar de secagem foi controlado com um fluxo de ar de $20 \text{ m}^3\text{min}^{-1}\text{m}^{-2}$, a temperaturas usadas foram três temperaturas de bulbo seco (30 °C, 35 °C e 40 °C) em combinação de 4 temperaturas de ponto de orvalho (7,5 °C, 11,2 °C, 16,2 °C e 20,4 °C). Para avaliar os efeitos da secagem sobre os grãos foram analisados a quantidade de defeitos pretos-verdes, alterações na cor, condutividade elétrica dos exsudados dos grãos e quantificação de trigonelina, ácidos clorogênicos e cafeína. As menores quantidades de defeitos pretos-verdes foram encontradas nas menores temperaturas de secagem tendo esses grãos os maiores valores de L^* e b^* , e menores de a^* ; também menores valores de condutividade elétrica e de ácidos clorogênicos.

Palavras – chave: *Coffea arabica* L.. Secagem. Frutos imaturos. Pretos-verdes. Bioativos.

1.INTRODUÇÃO

A cafeicultura tem um alto impacto na economia do Brasil, visto que este é o maior produtor e exportador de café do mundo (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2021).

A colheita do café em larga escala, é feita de forma heterogênea com relação a maturidade dos frutos, visto que não é possível selecionar apenas os maduros, por meio de colheita mecanizada, tendo então um percentual significativo de café verde, requerendo um manejo diferenciado, a fim de minimizar os indesejáveis defeitos pretos-verde. A atenção às etapas de pós-colheita, como processamento, a secagem, o armazenamento e o beneficiamento, são essenciais para manutenção da qualidade do produto final, e conseqüentemente, sua valorização econômica (BORÉM; ANDRADE; ISQUIERDO, 2014; DONG *et al.*, 2017). Dentre estas, a secagem é uma das principais etapas, por influenciar na qualidade final da bebida do café, como também por demandar mais gasto de energia, sendo um processo com altos custos financeiros, podendo ser feita em terreiros, com a utilização de energia solar ou em secadores mecânicos (MEZA, 2015; REZENDE, 2013).

De acordo com a classificação estabelecida pela Instrução Normativa nº 8, de 11/06/2003, a qual decretou o “Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado do Grão Cru” (BRASIL, 2003), tanto o grão verde e o preto-verde têm a espermoderma aderida ao endosperma, sendo a diferença entre eles a sua coloração do grão, onde o denominado de preto-verde é de cor preta. Alterações na cor dos grãos são fortes indicadores de que ocorreram processos oxidativos e transformações bioquímicas enzimáticas que alteram a composição dos precursores responsáveis pelo sabor e aroma da bebida, resultando em diminuição da qualidade (ABREU *et al.*, 2015; BORÉM *et al.*, 2013; RENDÓN; SALVA; BRAGAGNOLO, 2014).

O teste de condutividade elétrica baseia-se no fato de que membranas que apresentam algum tipo de deterioração apresentam menor taxa de reparo da membrana celular quando as sementes são expostas ao meio aquoso, ocasionando a perda de compostos para o meio (MARCOS FILHO, 2015). Assim, a deterioração das membranas dos grãos, como as do café, pode caracterizar o início da degradação da qualidade do produto (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

O método de secagem deve ser bem estabelecido, especialmente para cafés imaturos, visto que conforme as temperaturas e taxas de redução de água empregadas, podem ocasionar

transformações físicas e químicas. Diversos autores afirmam que temperaturas do ar de secagem superiores à 40 °C na massa de café, provocam danos térmicos reduzindo a qualidade, devendo ser diminuída para 35 °C, dependendo do percentual de cafés verdes (BORÉM; REINATO; ANDRADE, 2008; ISQUIERDO *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013; TAVEIRA, 2009). Diante da escassez de pesquisas relacionadas à secagem de cafés imaturos, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar os efeitos na qualidade dos grãos de café verde, secos em diferentes temperaturas de bulbo seco e da temperatura de ponto de orvalho.

2.MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção e descrição da matéria-prima

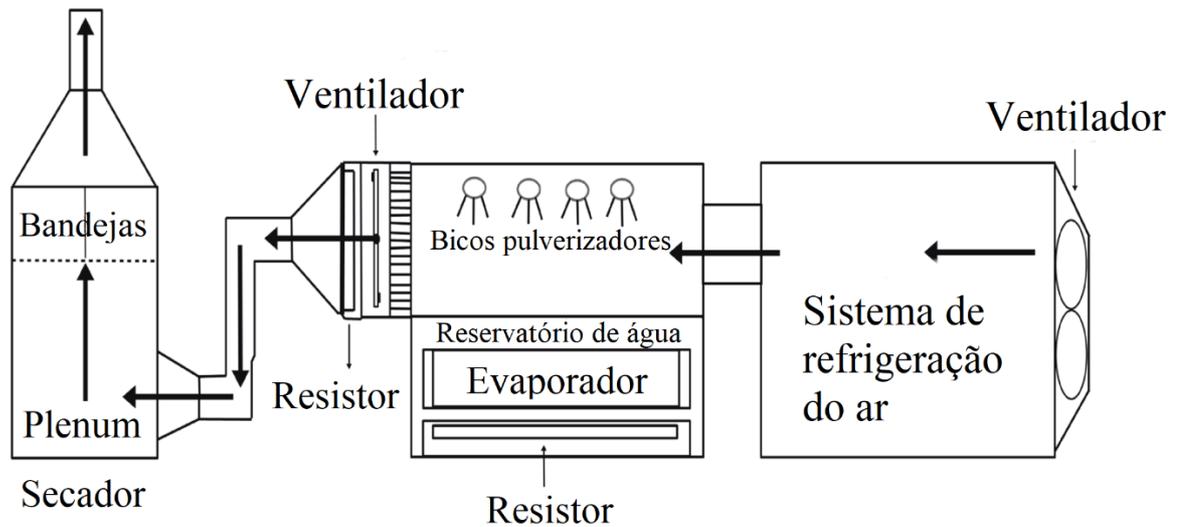
Foram utilizados frutos verdes de café (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí 62) colhidos de forma manual nos campos experimentais no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA)

O café foi colhido de forma manual e seletivamente, priorizando os no estágio de maturação verde. Após colhidos, os cafés foram levados ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas da UFLA, onde promoveu-se a separação hidráulica, retirando-se dos frutos colhidos aqueles chochos, mal granados, boias e passas, e posteriormente foram novamente selecionados para retirada do café verde-cana, tentando garantir que apenas os cafés verdes fossem encaminhados à secagem. Os cafés foram secados na sua integridade, realizando o processamento via seca que produz os cafés conhecidos como naturais. Os frutos, no momento da colheita, apresentavam teor de água de $2,50 \pm 0,08$ kg.kg⁻¹ (b.s.) e após a secagem mecânica eles atingiram o teor de água de $0,139 \pm 0,01$ kg.kg⁻¹ (b.s.). Para determinação do teor de água inicial dos frutos de café foi utilizado o método padrão de estufa, 105 °C, durante 24 horas de acordo com a Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Para verificar o teor de água final dos grãos de café, foi utilizado o método padrão de estufa a 105 °C, por 16 horas, conforme método padrão internacional da ISO 6673 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION -ISO, 2003).

2.2 Sistema de secagem

O sistema para a secagem das amostras é composto por unidade de condicionamento de ar acoplada a um secador de camada fixa (Figura 13).

Figura 13 - Sistema utilizado na secagem mecânica.



Fonte: Isquierdo *et al.* (2013).

O sistema de condicionamento de ar de laboratório (SCAL) foi utilizado para controlar as características do ar de secagem conforme modelo proposto por Fortes *et al.* (2006). Esse equipamento permite o controle do fluxo do ar, da temperatura de secagem e da temperatura da água que satura o ar dentro do SCAL. Em 6 (seis) tratamentos, o ar foi pré-condicionado antes de entrar no SCAL, por um sistema de refrigeração composto por três unidades de ar condicionado em série. Onde os cafés são acondicionados para secar são compostos por quatro bandejas removíveis com fundo perfurado, de seção quadrada, com os quatro lados iguais de 0,3 m e profundidade de 0,1 m, elas estão em um mesmo nível e ficam localizadas, sobre um plenum para uniformização do fluxo de ar. A temperatura do ar de secagem foi monitorada no plenum, e a temperatura da água dentro do SCAL, por termopares, tipo k, conectados a controladores universais marca Novus, modelo N1100. Um inversor de frequência marca Weg, modelo CFW-10 foi o controlador da rotação do ventilador centrífugo que insufla o ar aquecido no plenum, assim sendo, ele regulou o fluxo de ar.

2.3 Procedimento e delineamento experimental

Para acompanhamento da secagem até o teor de água desejado foi utilizado o método gravimétrico, de perda de massa, até atingir o teor de água desejado. A perda de massa foi monitorada com o uso de uma balança analítica, com resolução de 0,01 g. As pesagens das

amostras foram mais frequentes no início da secagem (de hora em hora, nas primeiras 6 horas) e com maiores espaçamentos ao longo do processo.

Foi feito um rodízio de 90° na posição das bandejas para minimizar possíveis diferenças de temperatura e fluxo de ar entre elas.

Conhecendo-se a massa e teor de água inicial dos frutos de café, foi possível saber o teor de água no tempo t , a partir da equação 1:

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

em que,

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

M_{ai} : massa de água inicial (kg);

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

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

M_{ms} : massa de matéria seca (kg).

O fluxo de ar foi verificado por um anemômetro de pás, para uma velocidade constante durante a secagem de 0,33 m.s⁻¹, que corresponde a um fluxo de 20 m³min⁻¹m⁻², e a temperatura do ar de secagem no plenum e a da água que satura o ar dentro do SCAL foram registradas a cada 10 minutos por datalogger modelo Testo 175T3, com dois termopares tipo T.

No total, foram realizados 12 tratamentos, em esquema fatorial 3x4, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo três temperaturas de bulbo seco (30 °C, 35 °C e 40 °C) e 4 temperaturas de ponto de orvalho (7,5 °C, 11,2 °C, 16,2 °C e 20,4 °C). Para cada tratamento foram realizadas 4 repetições. Essas combinações de temperaturas de bulbo seco (T_{bs}), com temperaturas de ponto de orvalho (T_{po}) resultaram em diferentes umidades relativas (UR) do ar de secagem (Tabela 7).

Tabela 7- Condições do ar de secagem dos 12 tratamentos de secagem resultantes das combinações de temperaturas de ponto de orvalho, temperaturas de bulbo seco e respectivas umidades relativas.

Tbs (°C)	Tpo (°C)	Umidade relativa (%)
30,0	7,5	24,4
	11,2	31,3
	16,2	43,4
	20,4	56,5
35,0	7,5	18,4
	11,2	23,6
	16,2	32,7
	20,4	42,6
40,0	7,5	14,1
	11,2	18,0
	16,2	24,9
	20,4	32,5

Fonte: Do autor (2021)

A temperatura de bulbo seco utilizada nesse experimento é a normalmente utilizada para frutos verdes de café (35 °C), e incluídas uma temperatura superior (40 °C) e outra inferior (30 °C). Quanto a temperatura de ponto de orvalho, normalmente, no período da colheita do café, entre os meses de maio e agosto, na região Sul de Minas, as temperaturas de bulbo seco e as umidades relativas médias situam-se, respectivamente, nas faixas de 16,5 °C e 71%, o que representa a uma temperatura e ponto de orvalho de aproximadamente, 11,2 °C. Na mesma época do ano, em regiões mais úmidas, como as Matas de Minas a correspondente temperatura de ponto de orvalho, equivaleria a 16,2 °C. Além dessas duas temperaturas de ponto de orvalho, foram incluídas uma inferior (7,5 °C) e uma superior (20,4 °C).

2.4 Classificação física

Foi utilizada a classificação estabelecida pela Instrução Normativa nº 8, de 11/06/2003, a qual decretou o “Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado do Grão Cru” (BRASIL, 2003), para identificação dos defeitos do café. Para verificação da porcentagem de defeito preto-verde e verde foram contadas a quantidade deles em uma porção de 50 gramas de cada repetição das secagens.

2.5 Análise de cor

O café beneficiado, e sem retirada de grãos defeituosos ou separação por peneira, foram analisados em relação a cor utilizando espectrofotômetro Delta Color, modelo Delta Vista 450 G, de geometria óptica $d/0^\circ$, iluminante padrão D65 e ângulo de observação padrão de 10° . A análise foi feita através do enchimento, com os grãos, de um acessório próprio para esse tipo de material. Foram realizados 3 enchimentos de cada uma das 4 repetições dos 12 tratamentos. A cor foi expressa em parâmetros da escala desenvolvida pela Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) L^* , a^* , b^* , a coordenada L^* expressa o grau de luminosidade da cor medida ($L^* = 0$, preto; 100, branco). Os valores de a^* expressam o grau de variação entre o vermelho e o verde (a^* negativo = verde; a^* positivo = vermelho) e, a coordenada b^* , o grau de variação entre o azul e o amarelo (b^* negativo = azul; b^* positivo = amarelo).

2.6 Condutividade elétrica

As metodologias de determinação da condutividade elétrica nos grãos de café foram realizadas segundo adaptação da metodologia proposta por Malta; Pereira e Chagas (2005).

Foram analisados somente os grãos chatos que ficaram retidos entre as peneiras 13 a 19, de crivos circulares, e que foram classificados como verdes, excluindo os defeitos pretos-verdes.

Duas amostras de 50 grãos de cada repetição das secagens foram pesadas em balança de precisão de 0,001g e imersas em 75 mL de água destilada (no interior de copos plásticos de 200 mL de capacidade) e colocadas em ambiente a 25°C . Após o período de embebição de 3,5 horas, as soluções foram agitadas logo antes de realizar a leitura da condutividade elétrica em condutivímetro marca BEL, modelo W12D. Os resultados foram expressos em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de amostra.

2.7 Análise de bioativos

Os compostos não-voláteis cafeína, trigonelina e ácidos clorogênicos foram determinados por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), segundo metodologia adaptada de Vitorino *et al.* (2001) por Malta e Chagas (2009), em duas repetições de cada tratamento, sem alteração da amostra. Amostras de 0,5 g de café cru moído foram extraídas em

50 mL de água destilada em ebulição e colocadas em banho-maria, com água em ebulição, durante 3 min. O extrato foi filtrado em papel de filtro comum e em seguida, filtrado em membrana de 0,45 µm. A determinação desses compostos foi realizada em cromatógrafo da marca Shimadzu, com sistema de detecção por arranjo de diodos (modelo SPD-M10A), coluna cromatográfica Discovery C18 (250 x 4,6 mm, 5 µm), comprimento de onda de 272 nm. A fase móvel constituiu-se de metanol : água : ácido acético (20:80:1), com vazão de 1 mL.min⁻¹. Para a identificação e análise quantitativa foi elaborada curva-padrão, utilizando-se padrões de cafeína, trigonelina e ácido-5-cafeoilquínico (5-ACQ).

2.8 Análises estatísticas

O experimento foi montado em esquema fatorial 3x4, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições (4 bandejas do secador de camada fixa).

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott a nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2013) com o pacote Easyanova (ARNHOLD, 2013).

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Quantidade de defeitos pretos-verdes

Na Tabela 8 apresenta-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios da porcentagem de defeitos pretos verdes.

Tabela 8 - Porcentagem de defeitos pretos verdes.

Tbs (°C)	Tpo (°C)			
	7,5	11,2	16,2	20,4
30	25,29 cB	31,81 cA	33,60 cA	23,96 cB
35	31,60 bB	36,91 bA	38,41 bA	39,44 bA
40	53,69 aB	57,60 aA	59,56 aA	52,62 aB

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna e letras maiúsculas dentro da linha não diferem entre si (P>0,05), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

Os dados da tabela 8 apresentam que dentro da mesma Tpo, que com o aumento da temperatura de secagem também ocorre um aumento da porcentagem média do defeito preto-verde mostrando que a temperatura é um fator que afeta o seu surgimento na secagem de um

lote de café de frutos verdes. Esses grãos imaturos fermentam facilmente quando exposto a temperaturas em torno de 40 °C (TEIXEIRA *et al.*, 1982).

Compostos fenólicos que se encontram próximo da parede celular tendem a reagir com enzimas presentes nos grãos formando polímeros marrons. Esse efeito de escurecimento também pode ser produzido com a desnaturação ou oxidação de compostos fenólicos, açúcares e proteínas (TEIXEIRA *et al.*, 1984).

Quando se avalia dentro da mesma temperatura de bulbo seco de 30 °C, ocorre a menor porcentagem média de defeitos pretos-verdes na Tpo de 20,4 °C e em 7,5 °C, que não se diferenciam significativamente, e os maiores valores se encontram nas duas Tpo intermediárias de 16,2 e 11,2 °C.

Na Tbs de 35 °C, não houve diferença significativa no percentual de pretos verdes para as Tpo's 11,2, 16,2 e 20,4 °C. Esses resultados têm a mesma tendência encontrada no trabalho realizado por Rios; Cardoso e Andrade (2021), que também dentro da mesma Tbs de 35 °C, teve uma maior quantidade de defeitos pretos-verdes na Tpo de 16,2 °C e menor porcentagem na menor Tpo avaliada por eles (2,6 e 10,8 °C).

Analisando dentro da Tbs de 40 °C, a porcentagem de defeitos pretos verdes foram menores na Tpo de 20,4 e 7,5 °C e maiores nas de 16,2 e 11,2 °C, comportamento igual ao encontrado na Tbs de 30 °C. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Andrade *et al.* (2019), que secando frutos verdes de café a 40 °C, também apresentaram maiores porcentagens de defeitos pretos verdes na umidade relativa intermediária (17,5 %) e menores quantidades na maior (32,5 %) e menor (10 %).

3.2 Parâmetros colorimétricos

Na Tabela 9 apresenta-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios do parâmetro colorimétrico L*.

Tabela 9 - Parâmetro L* (luminosidade) do café beneficiado.

Tbs (°C)	Tpo (°C)			
	7,5	11,2	16,2	20,4
30	44,08 aB	43,83 aB	43,20 aB	45,46 aA
35	44,23 aA	41,80 bB	42,975 aB	42,16 bB
40	42,84 bA	40,81 bB	40,16 bB	41,80 bA

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna e letras maiúsculas dentro da linha não diferem entre si ($P > 0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

O parâmetro L^* indica a luminosidade, onde amostras com valores mais elevados são mais claras comparadas com outras, mais escuras, que têm um valor mais baixo.

Analisando-se dentro de cada Tpo, pode-se observar que sempre ocorre uma diminuição desse parâmetro com o aumento da Tbs, indicando em média grãos mais escuros. Pode-se explicar isso pois dentro da mesma Tpo, também sempre ocorre o aumento da quantidade de defeitos pretos-verdes, tornado em média a amostra com menores valores de L^* .

Analisando-se dentro de cada Tbs, pode-se verificar que nas Tpo de 11,2 e 16,2 °C encontram-se os menores valores do parâmetro L^* , e também podemos relacionar isso com a quantidade maior de defeitos pretos-verdes presentes nessas Tpo intermediárias.

França *et al.* (2005) relatam que o parâmetro L^* sozinho pode ser empregado com sucesso para separar grãos defeituosos e não defeituosos antes da torra.

A análise de variância não indicou efeito significativo da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios do parâmetro colorimétrico a^* . Então são apresentados na tabela 10 e 11 os efeitos isolados de Tbs e Tpo.

Tabela 10 - Coordenada a^* do café beneficiado em função das diferentes Tbs.

Tbs (°C)	a^*
30	- 0,22 c
35	0,11 b
40	0,62 a

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

Tabela 11 - Coordenada a^* do café beneficiado em função das diferentes Tpo.

Tpo (°C)	a^*
7,5	0,20 a
11,2	0,07 a
16,2	0,16 a
20,4	0,26 a

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

A coordenada cromática a^* indica valores positivos para vermelho e valores negativos verde.

Pode-se avaliar nas tabelas 10 e 11 que somente apresentou diferença significativa quando comparados às diferentes Tbs. Ocorreu um aumento da coordenada a^* com o aumento

da temperatura. Como na Tbs de 30 °C é onde tem-se em média as menores quantidades de defeitos pretos-verdes, então teremos uma maior quantidade de grãos verdes o que é indicado com o menor valor de a*.

Coradi; Borém e Oliveira (2008) observaram maiores valores das coordenadas a* na temperatura de secagem de 60 °C, em que os cafés foram classificados como sendo de qualidade inferior em comparação aos secados a 40 °C, em secador mecânico.

Na Tabela 12 apresenta-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios do parâmetro colorimétrico b*.

Tabela 12 - Coordenada b* do café beneficiado.

Tbs (°C)	Tpo (°C)			
	7,5	11,2	16,2	20,4
30	7,82 bB	8,09 aB	7,58 aB	9,30 aA
35	9,32 aA	6,88 bB	7,75 aB	7,17 bB
40	8,08 bA	6,15 bB	5,27 bB	7,24 bA

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna e letras maiúsculas dentro da linha não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

A coordenada b* indica com valores positivos amarelo e com valores negativos azul. Pode-se observar que nos tratamentos que se tem a maiores quantidades de defeitos pretos-verdes é onde encontramos os menores valores da coordenada b*, e o inverso também é apresentado, com menores quantidades de defeitos pretos-verdes maiores valores de b*. Isso também foi relatado por Andrade *et al.* (2019), onde seu tratamento de secagem que teve os menores valores de porcentagem de defeitos pretos-verdes apresentaram os maiores valores de L* e b*. Rios *et al.* (2020) observaram uma tendência de menores valores de L* para a Tbs de 40 °C e menores valores da coordenada a*, nos menores tratamentos de Tbs (35 °C) e Tpo (2,6 °C).

3.3 Condutividade elétrica

Na Tabela 13 apresenta-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios da condutividade elétrica.

Tabela 13 - Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ de amostra) para grãos de café verde.

Tbs (°C)	Tpo (°C)			
	7,5	11,2	16,2	20,4
30	18,36 bB	19,67 cA	20,46 bA	17,70 cB
35	21,36 aB	23,01 bA	23,22 aA	20,74 bB
40	22,07 aB	25,19 aA	24,48 aA	25,37 aA

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna e letras maiúsculas dentro da linha não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

Analisando a condutividade elétrica dentro de cada Tpo, encontra-se que na de 7,5 °C e na Tbs de 30 °C apresenta o menor valor médio, o que é semelhante ao menor valor da porcentagem de defeitos pretos-verdes.

Na Tpo de 11,2 °C ocorre um aumento da condutividade elétrica com o aumento da Tbs, o que é o mesmo comportamento apresentado de crescimento da quantidade de defeitos pretos-verdes com o acréscimo das temperaturas de Tbs.

Na Tpo de 16,2 °C, a menor Tbs de 30 °C que apresenta o menor valor de condutividade elétrica. Quando se avalia a porcentagem média de defeitos pretos verdes nessa Tpo, os menores valores também são encontrados na mesma Tbs de 30 °C.

Dentro da Tpo de 20,4 °C há um aumento dos valores de condutividade elétrica com o aumento de Tbs. Esse mesmo comportamento de crescimento foi observado no aumento da quantidade de defeitos pretos-verdes com o aumento da temperatura de secagem.

Quando avaliamos dentro da Tbs de 30 °C os maiores valores de condutividade elétrica são nas Tpo de 16,2 e 11,2 °C e os menores valores nas Tpo de 20,4 e 7,5 °C. Esse comportamento nessa Tbs de 30 °C é igual ao encontrado na porcentagem de defeitos pretos-verdes.

Agora, observando dentro da Tbs de 35 °C, encontramos os maiores valores de condutividade elétrica nas Tpo de 16,2 e 11,2 °C e os menores valores nas Tpo de 20,4 e 7,5 °C. Em comparação com a porcentagem de defeitos pretos-verdes nessa mesma Tbs de 35 °C, observa-se o menor valor também no menor Tpo de 7,5 °C.

Avaliando dentro da Tbs de 40 °C, podemos verificar que o menor valor de condutividade elétrica foi encontrado na menor Tpo de 7,5 °C, onde também foi observado a menor porcentagem do defeito preto-verde.

A perda da seletividade da membrana celular está associada a diversos fatores, entre eles os danos sofridos pelo café durante as etapas de processamento e secagem. Então quanto

maior a deterioração ocorrida no processo de secagem, mais intenso será o aumento nos valores dessas análises (REINATO *et al.*, 2012).

Malta *et al.* (2013) verificaram menores valores de condutividade elétrica, lixiviação de potássio, acidez total titulável e maior atividade enzimática da polifenoloxidase nos cafés submetidos à secagem lenta à sombra, independente da forma de processamento utilizado. Esses resultados indicam menos danos aos sistemas de membranas celulares durante a secagem mais lenta, processada com menores taxas de remoção de água.

Diversos autores relataram que o tempo para a secagem é afetado pelas diferentes temperaturas do ar de secagem, e que a condutividade elétrica, lixiviação de potássio, acidez titulável total e acidez graxa, aumentam com aumento da temperatura da secagem independentemente do tipo de processamento (CORADI *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2018; SAATH *et al.*, 2012)

A condutividade elétrica e a lixiviação de potássio são indicadores da integridade das membranas celulares, e os açúcares estão envolvidos nos mecanismos de proteção de membranas. Pode-se considerar que a secagem lenta pode contribuir para o desenvolvimento de mecanismos de proteção para as membranas celulares, preservando sua integridade e, portanto, mantendo a qualidade do café (CORADI *et al.*, 2021), conforme observado nos resultados obtidos nessa pesquisa.

Como os grãos provenientes de frutos colhidos verdes encontram-se imaturos, suas paredes celulares e membranas não estão completamente formadas, e ainda não teve o máximo de acúmulo de matéria seca. Essas características dos grãos imaturos os tornam mais susceptíveis aos danos provocados pela secagem em altas temperaturas e taxas de secagem.

3.4 Compostos bioativos

Na Tabela 14 apresenta-se o desdobramento do efeito da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios de trigonelina.

Tabela 14 - Trigonelina (% da matéria seca).

Tbs (°C)	Tpo (°C)			
	7,5	11,2	16,2	20,4
30	1,535 aB	1,560 bB	1,700 aA	1,585 aB
35	1,510 aB	1,680 aA	1,645 aA	1,620 aA
40	1,535 aA	1,570 bA	1,570 bA	1,615 aA

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna e letras maiúsculas dentro da linha não diferem entre si ($P > 0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

De acordo com os resultados, não houve uma correlação dos tratamentos com a quantidade de trigonelina nos grãos de cafés provenientes de frutos verdes. A trigonelina varia de acordo com a espécie do grão, sendo que o café arábica, tanto no grão classificado como verde como no classificado como normal, possui em torno de 1,0 % (FRANÇA *et al.*, 2005), corroborando com os resultados da Tabela 14. Este composto é sensível à temperatura, podendo acarretar na degradação e geração de compostos voláteis e não voláteis (SOUZA *et al.*, 2010), entretanto não houve diminuição do percentual de trigonelina significativa entre as amostras secas com Tbs de 30°C para 40°C, que representasse essa degradação.

A análise de variância não indicou efeito significativo da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios de ácidos clorogênicos. Então são apresentados na tabela 15 e 16 os efeitos isolados de Tbs e Tpo.

Tabela 15 - Ácidos clorogênicos em função de diferentes Tbs.

Tbs (°C)	Ác. Clorogênico (% matéria seca)
30	3,830 c
35	4,132 b
40	4,950 a

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

Tabela 16 – Ácidos clorogênicos em função de diferentes Tpo.

Tpo (°C)	Ác. Clorogênico (% matéria seca)
7,5	4,061 b
11,2	4, 168 b
16,2	4,433 a
20,4	4,493 a

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ($P>0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

O ácido clorogênico é um bioativo com propriedades antioxidantes, antimutagênicas, anticancerígenas e anti-inflamatórias (GAWLIK-DZIKI *et al.*, 2014). De acordo com a Tabela 15 o percentual de ácido clorogênico foi diretamente proporcional ao aumento da temperatura do ar de secagem de bulbo seco, sendo que na Tbs de 40 °C, observa-se 4,95% de ácido clorogênico em matéria seca. Com o aumento da Tpo acima de 16,2 °C foi identificado o aumento significativo deste ácido. Farah; Monteiro e Trugo (2005) identificaram maior

quantidade de ácidos clorogênicos em café do defeito preto-verde, corroborando com os resultados encontrados neste estudo, uma vez que se observou aumento na porcentagem de pretos verdes com o aumento da temperatura de secagem.

A análise de variância não indicou efeitos significativos da interação entre a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de ponto de orvalho (Tpo), nos valores médios de cafeína. Então são apresentados na tabela 17 e 18 os efeitos isolados de Tbs e Tpo.

Tabela 17 - Cafeína em função de diferentes Tbs.

Tbs (°C)	Cafeína (% matéria seca)
30	1,654 a
35	1,584 a
40	1,621 a

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ($P > 0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

Tabela 18 - Quantidade de cafeína (% da matéria seca) em função de diferente Tpo.

Tpo (°C)	Cafeína (% matéria seca)
7,5	1,570 a
11,2	1,637 a
16,2	1,645 a
20,4	1,627 a

Médias seguidas por letra minúsculas iguais dentro da coluna não diferem entre si ($P > 0,05$), pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Do autor (2021)

A cafeína, por ser um alcaloide que apresenta relativa estabilidade à processos térmicos (FRANÇA; MENDONÇA; OLIVEIRA, 2005), não teve alteração significativa, de acordo com os valores apresentados na Tabela 17 e 18. O percentual de cafeína variou de 1,57% à 1,65%, acima dos valores encontrados por outros autores em cultivares brasileiros de arábica e híbridos, sendo na faixa de 1,05 a 1,54% (DUARTE; PEREIRA; FARAH, 2010; FARINHOTO, 2012), porem esses trabalhos retratam resultados para frutos maduros. Essa diferença observada da porcentagem de cafeína entre frutos maduros e verdes pode ser explicado pois França *et al.* (2005) estudando a quantidade desse composto em café arábica, encontraram diferença significativa quando analisado individualmente os grãos classificados como pretos, verdes e ardidos, em comparação aos grãos não defeituosos e uma mistura entre esses diferentes tipos.

4.CONCLUSÕES

Nas condições do presente estudo, as seguintes conclusões podem ser feitas:

Em relação ao surgimento dos defeitos pretos-verdes tem-se um aumento da sua ocorrência com a elevação da temperatura de bulbo seco, e quando analisada a temperatura de ponto de orvalho as de 20,4 °C e 7,5 °C são menos prejudiciais para o aparecimento desse tipo de defeito.

Os tratamentos de secagem que apresentam em média a maiores quantidades de defeitos pretos verdes apresentam menores valores das coordenadas colorimétricas L* e b* e maiores de a*.

Com o aumento da temperatura de bulbo seco na secagem ocorre maiores danos em nível celular, verificado através dos maiores valores de condutividade elétrica, e quando analisado dentro da temperatura de ponto de orvalho as menos lesivas são as de 20,4 °C e 7,5 °C.

Ao se analisar o efeito da secagem nas quantidades dos compostos bioativos a secagem teve um efeito evidente na quantidade de ácidos clorogênicos, pois com o aumento da Tbs também ocorreu um acréscimo desse composto.

REFERÊNCIAS

- ABREU, G. F. *et al.* Changes in the coffee grain color related to the post-harvest operations. **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 429-436, 2015.
- ANDRADE, E. T. *et al.* Mathematical modelling and immediate and latent quality of natural immature coffee under different drying conditions. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 5, p. 630-638, 2019.
- ARNHOLD, E. Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v. 50, n. 6, p. 488-492, 2013.
- BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T.; ISQUIERDO, E. P. Coffee drying. *In*: BORÉM, F. M. (Ed.). **Handbook of coffee post-harvest technology**. Georgia: Norcross, 2014. p. 97-118.
- BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. *In*: BORÉM, F. M. (Ed.). **Pós-colheita do café**. 1 ed. Lavras: Editora Ufla, 2008. v. 1, p. 205-240.
- BORÉM, F. M. *et al.* Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. **Journal of Stored Products Research**, v. 52, p. 1-6, 2013.
- BRASIL. **Instrução Normativa nº 8 de 11 de junho de 2003[café grão cru]** Brasília 2003. p. 1-15.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de café** v.8 safra 2021, n. 2 - Segundo Levantamento, Brasília, 2021. p. 1-63.
- CORADI, P. C.; BORÉM, F. M.; OLIVEIRA, J. A. Qualidade do café natural e despulpado após diferentes tipos de secagem e armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 181-188, 2008.
- CORADI, P. C. *et al.* Development and validation of a heated drying air diffusion system to optimize rotary dryers and final coffee quality. **PLOS ONE**, v. 16, n. 6, 2021.
- CORADI, P. C. *et al.* Adjustment of Mathematical Models and the Quality of Drying the Pulped Coffee at Different Air Conditions. **Journal of Agricultural Science and Technology**, p. 38-48, 2019.
- DONG, W. *et al.* Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. **Food Chemistry**, v. 234, p. 121-130, 2017.
- DUARTE, G. S.; PEREIRA, A. A.; FARAH, A. Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. **Food Chemistry**, v. 118, n. 3, p. 851-855, 2010.

FARAH, A.; MONTEIRO, M. C.; TRUGO, L. C. Distribuição de ácidos clorogênicos nos principais defeitos do café. *In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2005, Londrina - PR. Embrapa Café.*

FARINHOTO, R. J. C. R. **Análise física e química de cafés verdes com diferentes origens geográficas.** 2012. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia) - Universidade Nova, Lisboa. 2012.

FORTES, M. *et al.* Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 578-589, 2006.

FRANÇA, A. S.; MENDONÇA, J. C. F.; OLIVEIRA, S. D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. **LWT - Food Science and Technology**, v. 38, n. 7, p. 709-715, 2005.

FRANÇA, A. S. *et al.* Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, v. 90, n. 1, p. 89-94, 2005.

GAWLIK-DZIKI, U. *et al.* Lipoxygenase inhibitors and antioxidants from green coffee mechanism of action in the light of potential bioaccessibility. **Food Research International**, v. 61, p. 48-55, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION -ISO. **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**, v. 56, n. 3, p. 995, 2013.

MALTA, M. R.; CHAGAS, S. J. D. R. Avaliação de compostos não-voláteis em diferentes cultivares de cafeeiro produzidas na região sul de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 57-61, 2009.

MALTA, M. R.; PEREIRA, R. G. F. A.; CHAGAS, S. J. D. R. Condutividade elétrica e lixiviação de potássio do exsudato de grãos de café: alguns fatores que podem influenciar essas avaliações. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 5, p. 1015-1020, 2005.

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

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 363-374, 2015.

MEZA, L. E. R. Adaptive capacity of small-scale coffee farmers to climate change impacts in the Soconusco region of Chiapas, Mexico. **Climate and Development**, v. 7, n. 2, p. 100-109, 2015.

OLIVEIRA, A. P. L. R. *et al.* Comparative Study of the Physical and Chemical Characteristics of Coffee and Sensorial Analysis by Principal Components. **Food Analytical Methods**, v. 8, n. 5, p. 1303-1314, 2015.

OLIVEIRA, P. D. *et al.* Quality of natural and pulped coffee as a function of temperature changes during mechanical drying. **Coffee Science**, v. 13, n. 4, p. 415 - 425, 2018.

OLIVEIRA, P. D. *et al.* Physiological aspects of coffee beans, processed and dried through different methods, associated with sensory quality. **Coffee Science** v. 8, n. 2, p. 211-220, 2013.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2013.

REINATO, C. H. *et al.* Quality of the coffee dried on grounds with different surfaces and thickness layers. **Coffee Science**, v. 7, n. 3, p. 223-237, 2012.

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

REZENDE, J. E. Série Tecnológica Cafeicultura. Defeitos do café. : EMATER - MG: 6 p. 2013.

RIOS, P. D. A. *et al.* Colour variation in immature coffee dried under different dry bulb and dew point temperature conditions. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e539974419, 2020.

RIOS, P. D. A.; CARDOSO, D. B.; ANDRADE, E. T. Origin of black-green defect in the artificial drying of immature coffees. **Coffee Science**, v. 16, p. e161884, 2021.

SAATH, R. *et al.* Alterações na composição química e sensorial de café (*Coffea arabica* L.) Nos processos pós-colheita. **Energia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 96-112, 2012.

SOUZA, R. M. N. D. *et al.* Teores de compostos bioativos em cafés torrados e moídos comerciais. **Química Nova**, v. 33, n. 4, p. 885-890, 2010.

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.

TEIXEIRA, A. A. *et al.* Efeito da temperatura de secagem na caracterização dos defeitos provenientes de frutos colhidos verdes. *In*: 10 Colloque Scientifique International sur le Café, 1982, Salvador. Paris (Francia): ASIC, oct. 11-14. p. 73-80.

TEIXEIRA, A. A. *et al.* Observações sobre várias características do café colhido verde e maduro. *In*: 11 Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 1984, Londrina (Brasil). Rio de Janeiro (Brasil): Outubro 22-25. p. 227-228.

VITORINO, M. D. *et al.* Metodologias de obtenção de extrato de café visando a dosagem de compostos não-voláteis. **Revista Brasileira de Armazenamento (Brasil)(Especial Café no. 3)**, p. 17-24, 2001.