

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**VERÔNICA SILVA BITTI**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE CAFÉ CEREJA EM LEITO  
FIXO**

**VIÇOSA, MINAS GERAIS  
2020**

**VERÔNICA SILVA BITTI**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE CAFÉ CEREJA EM LEITO  
FIXO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Renata Cássia Campos

**VIÇOSA, MINAS GERAIS  
2020**

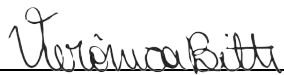
**VERÔNICA SILVA BITTI**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE CAFÉ CEREJA EM LEITO  
FIXO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 01 de dezembro de 2020.

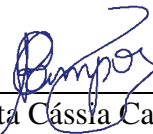
Assentimento:



---

Verônica Silva Bitti

Autora



---

Renata Cássia Campos

Orientadora

*À Deus e à minha família, minha base.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Vera e Ronaldo, por todo o amor incondicional, apoio e suporte durante toda a minha vida, nas minhas tomadas de decisão, por todos os ensinamentos, esforços e proteção, e por sempre proporcionarem e investirem na minha educação de excelência.

Ao meu irmão, Henrique, pela cumplicidade, que mesmo de longe sempre me apoiou e acabou seguindo o meu caminho na UFV, estando presente de perto no meu último ano de graduação.

À professora Renata Cássia Campos, minha orientadora neste trabalho, por todos os ensinamentos, confiança, paciência e apoio.

Ao professor Jaime Daniel Bustos Vanegas, por me ensinar tanto durante parte do seu projeto de doutorado, e agora por participar da minha banca de defesa deste trabalho.

Ao professor José Vitor Nicacio, por me dar a oportunidade de trabalhar diretamente como bolsista de iniciação científica na área de automação agrícola, no qual foi um grande desafio na graduação, e por todo o aprendizado durante esse tempo.

À empresa Kraft Heinz Company, pela experiência de estágio, o qual pude viver na prática o mercado de trabalho e aprender mais sobre a área de meio ambiente e segurança do trabalho, em especial aos meus gestores Pedro e Guilherme, por todo o apoio e ensinamentos.

Aos amigos da graduação e da vida, em especial à Desirée, Talissa, Rafael, Nathalia e Igor, pela companhia, ajuda, apoio e pelas lembranças que jamais serão esquecidas.

À minha grande amiga, Emanuele Graciosa, que me ensinou tanto não só sobre a vida como também sobre o mundo acadêmico, além de ter me dado a oportunidade de trabalhar na área de energia.

À CAPES, pela oportunidade de ser bolsista do programa “Ciência sem Fronteiras” e por ter possibilitado um intercâmbio acadêmico na Alemanha que mudou completamente a minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental durante esses anos e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

E a todos demais familiares e amigos que contribuíram para que fosse possível a conclusão desta importante etapa em minha vida.

## RESUMO

A qualidade da bebida de café é impactada diretamente pelas características da secagem na pós-colheita. Uma metodologia bastante utilizada para esse processo é a secagem em leito fixo, que possibilita dimensionar o sistema e ajustá-lo de acordo com as variáveis adotadas, com o intuito de proporcionar um resultado de melhor qualidade na bebida final. Porém, ainda são necessários alguns ajustes para a melhor utilização dessa técnica. Diante disso, este trabalho foi realizado com o objetivo de modelar matematicamente um sistema de secagem de cerejas de café em secador de leito fixo, a fim de se obter os parâmetros que resultam em uma bebida de melhor qualidade. Para isso, o experimento ocorreu em batelada, no qual foram coletadas manualmente cerejas de café (*Coffea arabica* L.) Bourbon amarelo, e parte das amostras foi levada à estufa de secagem para a determinação da umidade inicial. A outra parcela foi colocada em um secador de leito fixo, sendo submetida à secagem em seis binômios de temperatura (40°C e 50°C) e de velocidades do ar (0,5 m.s<sup>-1</sup>, 1,0 m.s<sup>-1</sup> e 1,5 m.s<sup>-1</sup>), realizando-se 6 tratamentos. Assim, as massas foram retiradas e pesadas periodicamente a fim de se obter as razões de umidade do processo. Com isso, pôde-se realizar a modelagem matemática para encontrar o modelo que representa o melhor ajuste aos dados observados. Para isso, utilizou-se dos resultados encontrados e das equações de modelagem citadas em literatura para se obter os parâmetros de cada modelo para cada tratamento, além dos coeficientes estatísticos para avaliar o grau de ajuste dos modelos. Dessa forma, o modelo de Midilli Modificado foi o que melhor descreveu o processo de secagem nas condições submetidas. Por fim, foi realizado o teste de xícara, no qual ocorreu a análise sensorial da bebida e, a partir de um provador credenciado da SCA (*Specialty Coffee Association*), os seis tratamentos foram classificados. Como resultado, todas as bebidas analisadas se enquadraram como cafés especiais, sendo que o tratamento 3 (temperatura de 40°C e velocidade de ar de 1,5 m.s<sup>-1</sup>) obteve a maior pontuação, classificado como o café de melhor qualidade (bebida estritamente mole).

Palavras-chave: ajuste de modelos, análise sensorial; *coffea arábica*; qualidade do café

## ABSTRACT

The quality of the coffee drink is directly impacted by the characteristics of drying in the post-harvest. A widely used methodology for this process is drying in a fixed bed, which makes it possible to dimension the system and adjust it according to the adopted variables, in order to provide a better quality result in the final drink. However, some adjustments are still necessary for the best use of this technique. Therefore, this work was carried out with the objective of mathematically modeling a drying system for coffee cherries in a fixed bed dryer, in order to obtain the parameters that result in a better quality drink. For this, the experiment took place in batch, in which yellow coffee cherries (*Coffea arabica* L.) were manually collected, and part of the samples was taken to the drying oven to determine the initial humidity. The other portion was placed in a fixed bed dryer, being subjected to drying in six binomials of temperature (40°C and 50°C) and air speeds (0.5 m.s<sup>-1</sup>, 1.0 m.s<sup>-1</sup> and 1.5 m.s<sup>-1</sup>), performing 6 treatments. Thus, the samples masses were removed and weighed periodically in order to obtain the moisture ratios of the process. With that, it was possible to perform mathematical modeling to find the model that represents the best fit to the observed data. For this, we used the results found and the modeling equations mentioned in the literature to obtain the parameters of each model for each treatment, in addition to the statistical coefficients to assess the degree of adjustment of the models. Thus, the Modified Midilli model was the one that best described the drying process in the submitted conditions. Finally, the cup test was carried out, in which the sensorial analysis of the drink occurred and, from an accredited taster from SCA (Specialty Coffee Association), the six treatments were classified. As a result, all the drinks analyzed were classified as special coffees, and treatment 3 (temperature of 40°C and air speed of 1.5 m.s<sup>-1</sup>) obtained the highest score, classified as the best quality coffee (strictly soft drink).

Keywords: *Coffea Arabica*; coffee quality; fit models; sensory analysis

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Secagem dos grãos de café no secador de leito fixo.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelagem matemática e análise estatística.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Análise sensorial.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>38</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O café é um produto agrícola que fornece uma excelente fonte de renda para a economia do país, contribuindo para o crescimento do agronegócio brasileiro. De acordo com a estimativa da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a safra de café de 2020 indica uma produção de 61,6 milhões de sacas beneficiadas, com um crescimento de 25% em relação a última safra (CONAB, 2020). Isso implica que a produção, a exportação e o alto consumo nacional e internacional têm fortalecido estudos e investimentos em cafés de cada vez mais qualidade para atender ao padrão de exigência dos consumidores.

A qualidade de bebida é verificada e preservada desde a produção das mudas até a colheita e pós-colheita. Na pós-colheita, uma das principais etapas que influenciam a qualidade do café é a secagem (BORÉM et al., 2008). O processo de secagem é realizado com o intuito de remover o excesso de água contida no produto, o que implica na redução da ocorrência de reações metabólicas como fermentações indesejáveis, as quais podem comprometer a qualidade do produto. Atualmente, estudos comprovam que temperaturas de secagem de café em grãos acima de 40°C danificam termicamente e comprometem a qualidade fisiológica e sensorial final do café natural e despulpado (ISQUIERDO, 2011; OLIVEIRA, 2010; TAVEIRA, 2009). Entretanto, ao utilizar temperaturas relativamente baixas, a análise dos fluxos de ar que interferem no processo é fundamental para otimizar metodologias de secagem e, conseqüentemente, avaliar os impactos positivos na bebida resultante.

Os grãos podem ser secos diretamente pelo sol e pelo vento, tanto na própria planta quanto em terreiros, o qual pode comprometer a uniformidade da secagem. Nesses dois métodos gasta-se mais tempo para realizar a secagem, o produto fica mais susceptível a variação das condições climáticas e pode manter contato direto com o solo, possibilitando o ataque de pragas e o desenvolvimento de fermentações indesejáveis. Nesses casos, a redução da qualidade do produto é passível de ocorrência, de acordo com Campos (1998).

Uma alternativa artificial para a secagem de café é a utilização de secadores de leito fixo. Com esse equipamento de fluxo contínuo em camadas delgadas, que se assemelha ao terreiro suspenso, há a possibilidade de utilização de diferentes temperaturas conforme a recomendação em literatura e de controle da velocidade e vazão dos fluxos de ar, possibilitando um maior controle do processo como um todo. Entretanto, ainda se faz necessário o desenvolvimento de estudos que indicam a forma de ocorrência da secagem em cerejas de café de acordo com a variação desses fluxos. Além disso, a simulação e a obtenção de informações

teóricas do comportamento de produto durante a secagem são fundamentais para que se reduzam os riscos e maximizem o rendimento do processo. Com isso, o ajuste de modelos matemáticos é uma técnica que pode contribuir para melhores resultados, no qual engloba o dimensionamento de equipamentos, as estimativas do tempo de secagem e o consumo de energia, fatores cruciais para a análise de custos do processo (MELO et al, 2016; SIQUEIRA et al., 2013).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho modelar matematicamente a secagem de cerejas de café em secador de leito fixo por meio da utilização de temperaturas e velocidades de ar comumente utilizadas na secagem de café, afim de se obter melhores qualidades sensoriais ressaltadas na bebida resultante.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Secagem de café e cafés especiais

Segundo Palacin et al. (2009) o café é considerado um produto com alto custo de secagem devido ao seu elevado teor inicial de água, além do fato de as características estruturais dos frutos e grãos estarem suscetíveis a danos que podem depreciar a qualidade do produto seco e, conseqüentemente, reduzindo o seu valor comercial. De acordo com Borém et al., (2008), diversos fatores podem comprometer a qualidade no produto final, os quais o método de secagem, a temperatura, a umidade relativa do ar de secagem e o tempo de secagem são os que se destacam.

Dessa forma, a crescente exigência por qualidade e a redução de custos de produção instigam produtores e pesquisadores a buscarem por novas tecnologias na cafeicultura, principalmente na fase de pós-colheita (BORÉM et al., 2008). Assim, pode-se afirmar que a secagem é a etapa de maior relevância nessa fase, portanto deve ser iniciada logo após a colheita com o intuito de reduzir, rapidamente, o alto teor de água da casca, da polpa e da mucilagem e para evitar as fermentações que podem prejudicar a qualidade do café.

Como o processo de secagem impacta diretamente na qualidade do café, deve-se priorizar a utilização de cafés com potencial para produzir bebida de alta qualidade em estudos e pesquisas referentes a esse processo. Entretanto, qualquer alteração na temperatura da massa ou na umidade relativa durante a secagem pode propiciar variações nas características sensoriais desses cafés (SIQUEIRA, 2014; ISQUIERDO et al., 2013; BORÉM et al., 2008).

Para se obter uma bebida de café de melhor qualidade, a utilização de cafés especiais está com uma demanda no mercado mundial em ascensão em proporções maiores do que os cafés comuns, visto que, atualmente, consumidores mais exigentes quanto aos aspectos qualitativos e quanto à sustentabilidade da cadeia agroindustrial já representam 12% do mercado internacional, de acordo com o Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2020). Ademais, a demanda por cafés especiais tem crescido em torno de 19% ao ano, em comparação com um crescimento de 2% do café *commodity* (EMBRAPA, 2018), sendo este ainda o café mais produzido e comercializado no Brasil.

O café especial é mais valorizado quanto mais rara e exótica for a sensação de prazer e percepção sensorial proporcionada ao consumidor (GIOMO; BORÉM, 2011), verificando a maior exigência do mercado consumidor. Por essa razão, nota-se a relevância e a necessidade da produção de cafés especiais para a agregação de valor do café brasileiro.

## 2.2 Cinética de secagem e modelagem matemática

A secagem é uma operação unitária realizada em uma etapa da pós-colheita dos produtos agrícolas com o intuito de verificar parâmetros como transferência de calor e remoção de umidade do produto (OLIVEIRA et al., 2006). Durante o processo, elimina-se água do produto de forma gradativa, a partir do momento em que o submete ao aquecimento. Como consequência disso, ao final do processo, obtém-se um produto seco e de boa qualidade, visto que uma barreira é criada para dificultar a proliferação de fungos e bactérias, possibilitando também o aumento do tempo de vida de prateleira do produto final (JUNIOR et. al., 2020; MARTINS et. al., 2019).

Uma ferramenta de alta relevância e frequentemente utilizada para obter-se informações fundamentais e necessárias principalmente para o desenvolvimento de processos e para o dimensionamento de equipamentos é o ajuste de modelos matemáticos para a secagem dos produtos agrícolas. Com essas informações, viabiliza-se estimar o tempo de secagem e, conseqüentemente, o gasto energético que refletirá no custo de processamento (SIQUEIRA; RESENDE. CHAVES, 2013; VILELA; ARTUR, 2008).

Na literatura são encontrados diversos modelos matemáticos (teóricos, semiempíricos e empíricos) a fim de analisar a secagem de produtos higroscópicos (ISQUIERDO, 2013; PUTRANTO et al., 2011; NILNONT et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010; BURMESTER; EGGERS, 2010; DI SCALA; CRAPISTE, 2008; HERNÁNDEZ-DÍAZ et al., 2008). Dessa forma, os modelos empíricos e semiempíricos geralmente são os mais utilizados nas análises de comportamento da secagem devido à facilidade de seu uso e por mostrar-se como melhores opções para a representação do processo. Entretanto, como desvantagem, sua validade se restringe às condições de faixas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar sob as quais os dados experimentais foram obtidos (ISQUIERDO, 2013; MOHAPATRA; RAO, 2005; BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992;).

De acordo com as condições do processo de secagem, alguns modelos matemáticos empíricos e semiempíricos podem ser ajustados para descrever a cinética de secagem de produtos capilares porosos higroscópicos da forma mais precisa. Encontra-se na literatura com frequência os modelos de Lewis, de Page, de Thompson, de Midilli Modificado, de Verna, e de Henderson e Pabis Modificado, nos quais têm sido ajustados para predizer o comportamento da secagem de produtos agrícolas (ISQUIERDO, 2013; CORRÊA et al., 2010; GONELI et al.,

2009; KASHANINEJAD et al., 2007; AKPINAR, 2006; ANDRADE et al., 2006; CORRÊA; RESENDE; RIBEIRO, 2006; MOHAPATRA; RAO, 2005).

### 2.3 Secador de leito fixo

Os secadores de leito fixo são caracterizados por constituírem sistema de aquecimento de ar, ventilador, câmara de distribuição de ar e câmara de secagem, e com isso, podendo diferenciar-se na altura quando comparado a um silo cilíndrico, apesar da semelhança física. Além disso, o leito de secagem possui fundo composto por chapas perfuradas que sustentam o produto à ser seco, local no qual o ar de secagem pode ser insuflado (SILVA et al., 2008, GARCIA et al., 2004; MILMAN, 2002).

Segundo Brooker et al. (1992), a espessura da camada, o teor de umidade inicial, o fluxo de ar, a temperatura do ar e o tempo de secagem são as principais variáveis do sistema de secagem de lotes em camada estacionária. Além disso, a temperatura de secagem impacta diretamente na taxa de secagem, visto que pode ocorrer a não uniformidade do teor final de umidade do produto, caso haja o aumento da temperatura e parte do produto não remova a umidade durante o processo, depreciando a qualidade final.

De acordo com Brooker et al, (1982), há vantagens e desvantagens para a utilização de secadores de leito fixo para um sistema de silo cheio (Tabela 1).

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do processo de secagem utilizando o leito fixo

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
A colheita pode ser feita a qualquer ritmo	Impossibilidade do uso de grãos com alto teor de umidade
Operação simples	Período longo de operação
Manuseio mínimo dos grãos	
Alta eficiência energética	
Não ocorrência de secagem excessiva	
Baixo índice de quebra de grãos com baixas temperaturas	

Fonte: Adaptado de Brooker et al. (1982).

### 2.4 Análise sensorial da bebida

De acordo com as recomendações da da Instrução Normativa nº 8 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), os cafés commodities são classificados a partir de uma análise sensorial considerada um teste de xícara, podendo ser nomeado como bebida

estritamente mole, mole, apenas mole, dura, riado, rio e rio zona (BRASIL, 2003). Entretanto devido à escassez de padronização no procedimento, principalmente com relação a torrefação, essa avaliação sensorial é limitada, não sendo satisfatória para a análise sensorial de cafés especiais, segundo Giomo e Borém (2011).

Dessa forma, foi elaborada uma análise sensorial realizada por provadores certificados, sendo esta a principal indicadora de qualidade do café. Essa avaliação engloba as principais percepções gustativas e olfativas sentidas no momento da prova sensorial da bebida. Apesar de ser considerada uma análise subjetiva, os resultados são aplicados e têm se apresentado de forma positiva, visto que, ao se comparar com as demais análises realizadas como indicadora de qualidade, obtém-se uma correlação satisfatória (BORÉM et al., 2013; CORADI; BORÉM; OLIVEIRA, 2008; CORADI et al., 2007; ISQUIERDO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2011; RIBEIRO et al., 2011).

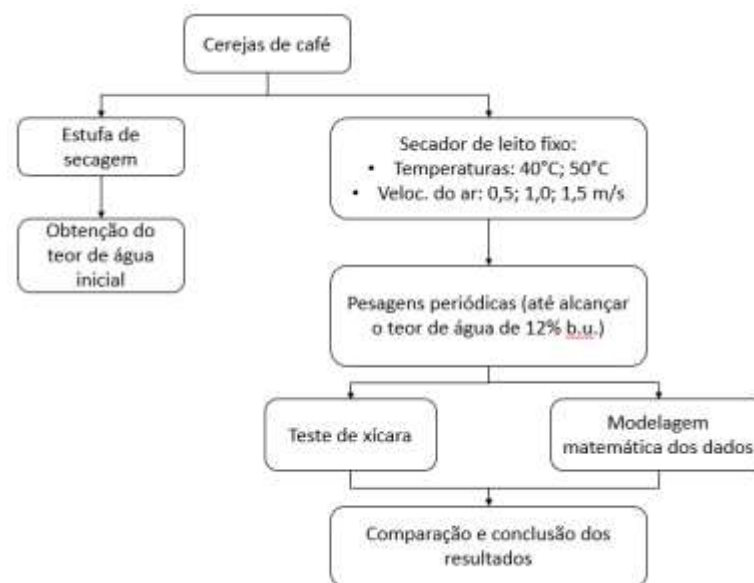
Na análise sensorial de cafés especiais, o provador credenciado principalmente da *Specialty Coffee Association* (SCA), fornece pontuações em cada um dos atributos sensoriais que constituem a bebida, incluindo além a nota global, de acordo com Giomo e Borém (2011). Dentre as metodologias existentes, o método da SCA se destaca e é considerado o método padrão, elaborado a partir da sistematização de avaliação sensorial da bebida proposta por Lingle (2001). Essa metodologia agrupa os atributos em duas categorias, sendo uma considerada subjetiva e a outra objetiva. A parte subjetiva engloba a análise a partir da fragrância ou aroma, sabor, sabor residual, acidez, corpo, equilíbrio e impressão global, e em seguida são pontuadas entre 6 a 10 de acordo com a qualidade determinada. A outra categoria é objetiva, pois engloba a classificação pela uniformidade, doçura e xícara limpa (ausência de defeitos), pontuadas entre 0 a 10 (GIOMO; BORÉM, 2011).

Vale ressaltar que o sabor da bebida representa a principal característica do café. A avaliação reflete a combinação das percepções observadas durante gustação. A pontuação final relacionada ao sabor abrange a intensidade, a qualidade e a complexidade da combinação entre o gosto e o aroma sentido quando o café é provado (SCA, 2009). Assim, para ser considerado um café especial, a pontuação deve ser a mais próxima de 100 e, além de apresentar um bom aspecto físico, a bebida deve ser totalmente aromática e agradável ao paladar, segundo Giomo e Borém (2011).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR). Foram utilizadas cerejas de café (*Coffea arabica* L.) Bourbon amarelo, proveniente de uma propriedade rural localizada em Viçosa, Minas Gerais, colhidas manualmente e no ponto de maturação cereja. Para compreender melhor como foram realizadas as etapas da parte experimental, foi elaborado um fluxograma do trabalho (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma das etapas de realização e desenvolvimento das atividades



Fonte: O autor.

Como pode ser observado no fluxograma da Figura 1, foram utilizadas as temperaturas de 40 e 50 °C e velocidades de ar de 0,5; 1,0 e 1,5 m.s<sup>-1</sup>, programadas no próprio secador, sendo efetuados 6 tratamentos. Os valores de temperatura que foram selecionados para o processo ocorreram devido a recomendação técnica, a qual indica valores máximos de 40 °C para a secagem de café descascado e de 45 °C para café em coco (REINATO; BORÉM, 2006; OTAVIANI, 2000; SILVA et al., 2000; GIRANDA, 1998; CASTRO, 1991). Já as velocidades de ar que foram selecionadas para o processo ocorreram devido a capacidade do secador, em que para valores de velocidade inferiores a 0,5 m.s<sup>-1</sup> o fluxo de ar que passa no secador não é

suficiente para a secagem, e valores de velocidade superiores a  $2 \text{ m.s}^{-1}$  são inviáveis, visto que o equipamento é limitado e não é possível atingir tais valores.

Como o processo ocorreu em batelada, foram realizadas 6 colheitas em diferentes momentos na mesma propriedade rural, uma para cada binômio de temperatura e velocidade do ar, obtendo-se seis diferentes amostras de produto. A seguir, as etapas desenvolvidas na parte experimental serão detalhadas.

### 3.1 Secagem dos grãos de café no secador de leito fixo

A secagem do produto foi realizada por via seca, processamento esse no qual as cerejas são secas na sua forma integral, o que representa a permanência da casca e da polpa no fruto, possibilitando a transformação em cafés em coco ou naturais. Além disso, as secagens foram realizadas em bateladas, de forma que todos os procedimentos da secagem ocorreram para cada tratamento separadamente. Uma vez que todas as amostras foram coletadas na mesma propriedade, desconsiderou-se as potenciais variações de qualidade, uma vez que todo o experimento foi realizado durante o período de colheita do café.

Assim, para cada tratamento, separou-se uma parte das amostras, a qual foram levadas à estufa para a determinação do teor de água inicial, a partir de análise gravimétrica, a  $105 \pm 1^\circ\text{C}$  durante 24h em três repetições (BRASIL, 2009). Em seguida, foi realizada a pesagem das amostras em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g. Com esse resultado, possibilitou-se determinar o ponto final de parada de cada secagem, no momento em que as amostras alcançassem o teor de água de aproximadamente 12% b.u., seguindo a Instrução Normativa nº 8 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2003), originando o “café em coco”.

Para a determinação do ponto final de parada de cada secagem, calculou-se a massa da amostra no final da secagem, a partir das Equações 1 e 2.

$$X = \frac{m_a}{m_t} * 100 \quad (1)$$

$$X^* = \frac{m_a}{m_s} * 100 \quad (2)$$



Em que:

$X$  – teor de água do produto em base úmida (% b.u.);

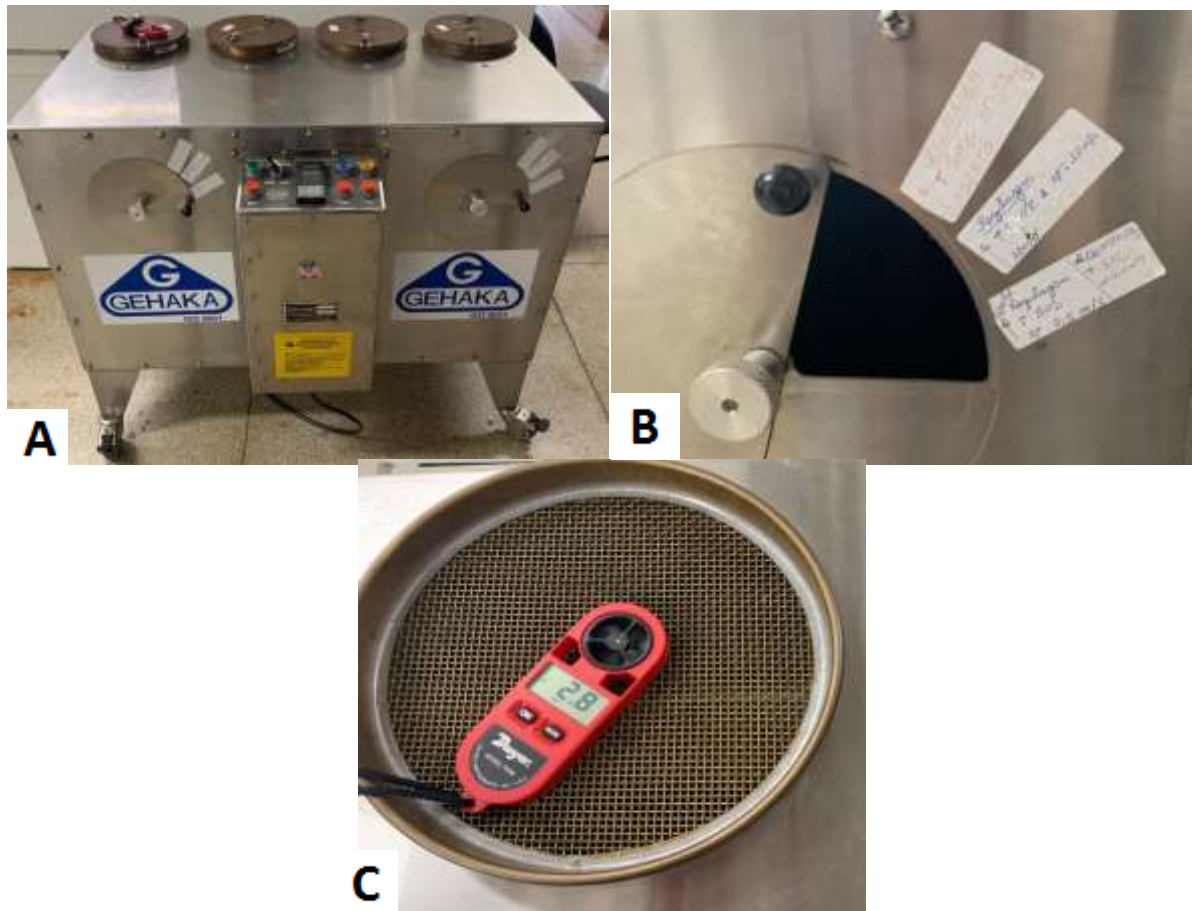
$X^*$  – teor de água do produto em base seca (% b.s.);

$m_a$  – massa de água do produto (g);

$m_t$  – massa total do produto (g);

Durante o processo de secagem foi utilizado um secador de leito fixo (Figura 2 - A), considerado um protótipo de secador mecânico de camada fixa, fluxo contínuo, da marca *Grainman*, modelo nº 66, desenvolvido nos EUA, com a possibilidade de controle das variáveis analisadas (temperatura e velocidade do ar de secagem), mantendo-se a estabilidade destas variáveis com oscilações desprezíveis (+/- 2%). Para a verificação e confirmação da velocidade do ar que passava pelo leito, foi utilizado um anemômetro de hélice (Figura 2 - C).

Figura 2 – Secador de leito fixo (A), abertura das venezianas (B) e anemômetro de hélice (C)



Fonte: O autor.

No equipamento de secagem (Figura 2 – A), foi possível escolher a temperatura do ar de secagem e, dessa forma, as velocidades de ar empregadas ocorreram a partir da abertura das venezianas (Figura 2 – B), as quais foram monitoradas pelo anemômetro (Figura 2 – C).

Além disso, periodicamente, as amostras foram pesadas para a verificação da saída de água do produto e seus valores foram registrados. Quando o produto se encontrou na forma de café em coco, o que significa que alcançou um teor de água de aproximadamente 12% b. u., foi descascado manualmente, embalado em plástico de alta barreira de polipropileno e mantido em BOD a 20°C até ser enviado a um provador credenciado para o teste de xícara, no qual foi realizado uma análise sensorial e possibilitou a classificação da qualidade da bebida final.

### 3.2 Modelagem matemática e análise estatística

As massas registradas periodicamente durante a secagem permitiram o cálculo da razão de umidade ao longo do processo. Para a determinação das razões de umidade do café cereja na secagem para diferentes condições de ar utilizou-se a Equação 3.

$$RX = \frac{X^* - X_e^*}{X_i^* - X_e^*} \quad (3)$$

Em que:

RX – razão de umidade do produto, adimensional;

$X^*$  – teor de água do produto, ( $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{massa seca}}^{-1}$ );

$X_i^*$  - teor de água inicial do produto, ( $\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{massa seca}}^{-1}$ );

$X_e^*$  - teor de água de equilíbrio do produto, ( $\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{massa seca}}^{-1}$ ).

De posse dos valores das razões de umidade, permitiu-se a ocorrência da modelagem matemática dos resultados, utilizando modelos matemáticos amplamente encontrados em literatura, como as equações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações de modelagens matemáticas para predizer a razão de umidade ao longo do tempo de secagem

Equação	Modelo	
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	Aproximação da Difusão	(4)
$RX = a \exp(-k t) + b \exp(-g t)$	Dois Termos	(5)
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	Exponencial de Dois Termos	(6)
$RX = a + b \exp(-t/c)$	Gomper	(7)
$RX = a \exp(-k t)$	Henderson e Pabis	(8)
$RX = a \exp(-k t) + b \exp(-g t) + c \exp(-h t)$	Henderson e Pabis Modificado	(9)
$RX = a \exp(-k t^n) + (b \exp(-g t^n))$	Hii et. al	(10)
$RX = a \exp(-k t) + c$	Logarítmico	(11)
$RX = a \exp(-k t^n) + b t$	Midilli	(12)
$RX = \exp(-k t^n) + b t$	Midilli Modificado	(13)
$RX = \exp(-k t)$	Newton	(14)
$RX = \exp(-k t^n)$	Page	(15)
$RX = \exp((-a - (a^2 + 4 b t)^{0.5}) / 2 b)$	Thompson	(16)
$RX = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-g t)$	Verma et. al	(17)
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Singh	(18)

RX - Razão de umidade do produto; t – tempo de secagem (h); k, g, h, a, b, c, n – parâmetros dos modelos matemáticos. Fonte: Adaptado de Côrrea et. al, 2007.

Com isso, utilizou-se o *software* Statística 7.0, no qual viabilizou a avaliação do grau de ajuste dos modelos a partir do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ), do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado ou desvio padrão (SE), além de viabilizar a análise de tendenciosidade dos valores calculados a partir da distribuição de resíduos dos modelos aplicados. Assim, segundo as Equações 19 e 20, possibilitou-se estimar os valores de P e de SE.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (19)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (20)$$

Em que:

Y - valor observado experimentalmente;

$Y_0$  - valor calculado pelo modelo;

n - número de observações experimentais;

GLR - número de graus de liberdade (número de observações experimentais menos o número de parâmetros do modelo).

Com os dados coletados para a secagem e os parâmetros calculados, foram efetuadas análises e foram desenvolvidas hipóteses que possam explicar melhor os dados e os resultados obtidos.

### **3.3 Análise sensorial**

Na última etapa do trabalho, foi realizada a análise sensorial, considerado o “teste de xícara”, no qual utilizou-se a metodologia SCA (*Specialty Coffee Association*) a partir de um provador credenciado da mesma associação que, após degustar a bebida, avaliou os atributos sensoriais com foco em sabores (doce, salgado, amargo e azedo) e aromas (cheiros de origem enzimática, caramelização e destilação seca) (SCA, 2009). O primeiro passo constituiu na identificação desses grandes grupos e depois o aprofundamento na descrição dos sabores e aromas de cada subgrupo. Assim, aspectos mais específicos como adstringência, acidez, doçura e corpo da bebida foram as principais características avaliadas.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a retirada das parcelas das amostras da estufa de secagem, as cerejas de café foram pesadas e, com isso, obteve-se o teor de água inicial de cada conjunto de amostras (Tabela 3).

Tabela 3 - Teor de água inicial (% b.u.) de cada conjunto de amostras para os 6 tratamentos, obtidos após a secagem de parte das amostras em estufa

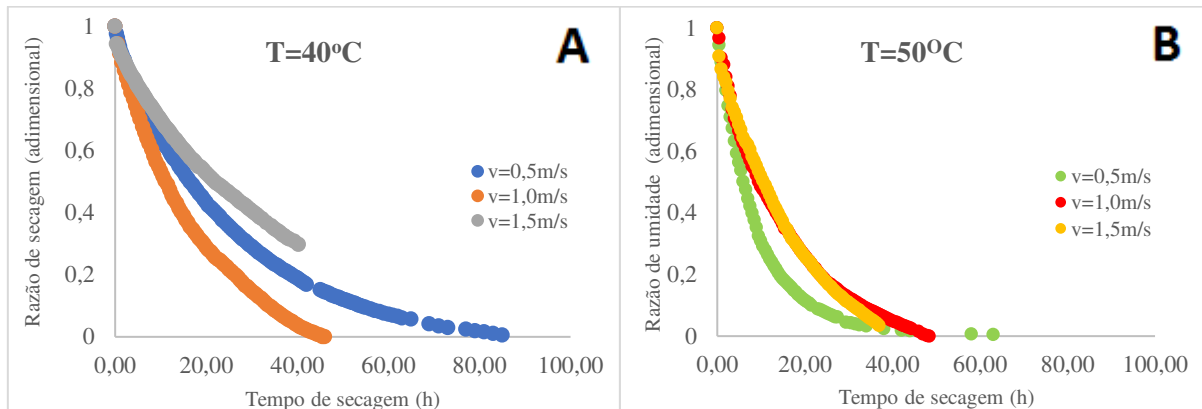
<b>Tratamento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Teor de água inicial (% b.u.)</b>
1	40,00	0,50	66,00
2	40,00	1,00	66,35
3	40,00	1,50	66,42
4	50,00	0,50	66,00
5	50,00	1,00	66,00
6	50,00	1,50	66,42

Fonte: O autor.

Como se pode observar a partir da Tabela 3, os valores dos teores de água inicial das cerejas de café de todas as amostras foram, aproximadamente, de 66%. A baixa variação entre os valores indica que as cerejas de café foram colhidas em datas próximas, o que reforça o desenvolvimento de uma “padronização das cerejas” e, dessa forma, auxilia na discussão dos resultados experimentais, os quais foram ressaltados no teste de xícara no final do processo.

Cada conjunto de amostras remanescentes foi submetido aos 6 tratamentos durante a secagem em um secador de leito fixo, sendo que os tratamentos foram realizados em momentos distintos. Ao longo do processo de secagem, as massas foram retiradas e pesadas, periodicamente. A partir da coleta desses dados, foram demarcadas quais massas de produto definiriam o final do processo, no momento em que o produto atingisse o teor de água final de 12% b.u. De posse dos dados, foram calculados os valores de razão de umidade e foram elaborados gráficos apresentando as razões de umidade durante a secagem para os seis tratamentos utilizados. A Figura 3 apresenta os gráficos do comportamento das secagens das cerejas de café relacionando o tempo de secagem por razão de umidade, comparando ao fixar uma temperatura e variando as velocidades de ar.

Figura 3 – Gráficos comparativos entre os tratamentos 1, 2 e 3 (A), ou seja, para temperatura (T) de 40°C e velocidades de ar com  $v=0,5\text{m.s}^{-1}$ ,  $v=1,0\text{m.s}^{-1}$  e  $v=1,5\text{m.s}^{-1}$  e entre os tratamentos 4, 5 e 6 (B), ou seja, para temperatura (T) de 50°C e velocidades de ar com  $v=0,5\text{m.s}^{-1}$ ,  $v=1,0\text{m.s}^{-1}$  e  $v=1,5\text{m.s}^{-1}$

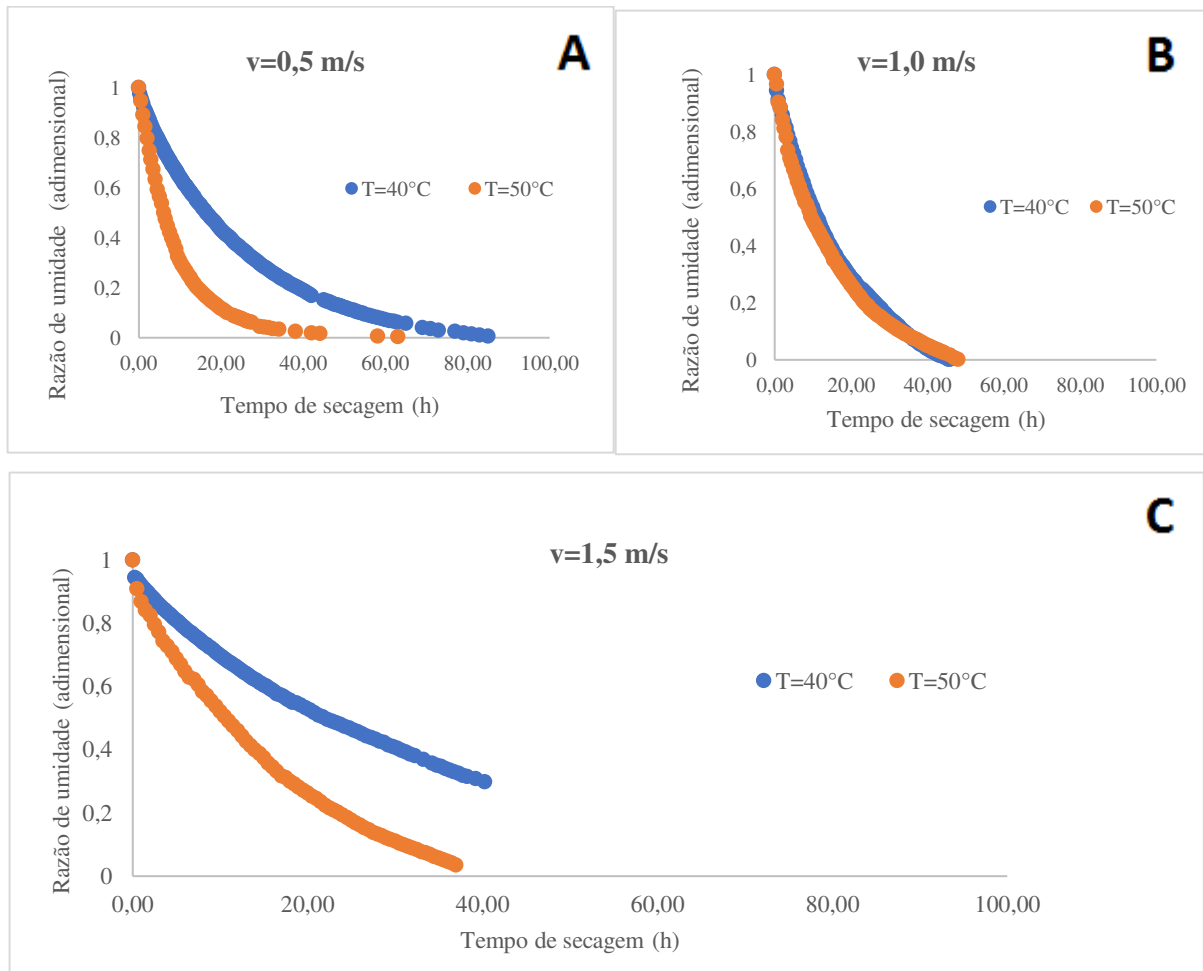


Fonte: O autor.

Com relação aos dados experimentais, avaliou-se primeiramente o comportamento da secagem para uma dada temperatura ao variar as velocidades de ar ao longo do processo. A Figura 3 apresenta os gráficos do comportamento do produto relacionando o tempo de secagem pela razão de umidade para as temperaturas de 40 (A) e 50°C (B), respectivamente, variando-se as velocidades do ar ( $v=0,5\text{ m.s}^{-1}$ ,  $v=1,0\text{ m.s}^{-1}$  e  $v=1,5\text{ m.s}^{-1}$ ). Portanto, ao analisar os gráficos, pode-se inferir que em secagens com temperaturas mais elevadas (no caso, 50°C), considerando a mesma variação de velocidade do ar, o tempo de secagem é menor, comportamento já esperado.

Além disso, ao considerar uma velocidade fixa de ar e variando-se as temperaturas ( $T=40^\circ\text{C}$  e  $T=50^\circ\text{C}$ ), obtiveram-se os gráficos da Figura 4 (A, B e C), os quais apresentaram o comportamento da secagem do produto relacionando o tempo de secagem com a razão de umidade durante o processo, adotando-se as velocidades de ar de  $0,5\text{ m.s}^{-1}$ ,  $1,0\text{ m.s}^{-1}$  e  $1,5\text{ m.s}^{-1}$ , respectivamente.

Figura 4 – Comportamento das secagens das cerejas de café relacionando o tempo de secagem por razão de umidade, comparando (A) ao fixar a velocidade de ar em 0,5m/s e variando as temperaturas (T=40°C e T=50°C); (B) ao fixar uma velocidade de ar em 1,0 m/s e variando as temperaturas e (C) ao fixar uma velocidade de ar em 1,5 m/s e variando as temperaturas



Fonte: O autor.

Como resultado, cada gráfico apresentou um comportamento diferente. Na Figura 4A, sendo a velocidade de  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para uma temperatura de  $50^\circ\text{C}$  ocorreu-se uma secagem mais rápida e brusca inicialmente, e permaneceu secando até o momento em que a secagem foi finalizada, 64 horas depois, já para a temperatura de  $40^\circ\text{C}$  o produto secou-se completamente em 85 horas.

Na Figura 4B, considerando uma velocidade de ar ( $v$ ) de  $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , observou-se um comportamento semelhante das curvas para ambas as temperaturas, ou seja, tanto para temperatura ( $T$ ) de  $40^\circ\text{C}$  quanto para a temperatura de  $50^\circ\text{C}$  o tempo de secagem foi

aproximadamente o mesmo, sendo que o produto do tratamento 2 ( $T=40^{\circ}\text{C}$  e  $v=1,0\text{ m.s}^{-1}$ ) secou em 46 horas e do tratamento 5 ( $T=50^{\circ}\text{C}$  e  $v=1,0\text{ m.s}^{-1}$ ) secou em 48,5 horas.

Na Figura 4C, ao utilizar uma velocidade de ar de  $1,5\text{ m.s}^{-1}$ , ou seja, maior do que as outras velocidades já aplicadas, a temperatura também influenciou diretamente no comportamento da secagem, visto que, para a temperatura de  $T=50^{\circ}\text{C}$  o produto secou em 37 horas e para a temperatura de  $T=40^{\circ}\text{C}$  o produto secou em 40,25h.

Observa-se que o menor tempo de secagem dentre todos os tratamentos submetidos ocorreu nas condições de  $T=50^{\circ}\text{C}$  e  $v=1,5\text{m.s}^{-1}$ , ou seja, em velocidades de ar elevadas com temperaturas também elevadas, o tempo de secagem do produto é reduzido, o que já era de se esperar. Vale ressaltar que, apesar de um tratamento fornecer uma secagem mais acelerada, o objetivo principal é obter uma qualidade melhor na bebida final, o que não está diretamente relacionado com esse parâmetro e, por isso, outros parâmetros também foram analisados.

De posse das razões de umidade verificadas ao longo do processo de secagem, foi efetuada a modelagem matemática dos dados experimentais, de forma a encontrar o modelo matemático que demonstra o melhor ajuste aos dados observados. Assim, a Tabela 4 apresenta os parâmetros estatísticos de cada modelo matemático e a Tabela 5 apresenta os valores estatísticos para a avaliação do grau de ajuste dos modelos, ou seja, os valores do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ), do erro médio relativo (P) e do desvio padrão (SE), além da análise de tendenciosidade a partir da distribuição dos resíduos, todos obtidos pelo *software* Statística 7.0.



Tabela 4 – Parâmetros estatísticos dos modelos para os 6 tratamentos, sendo T a temperatura e v a velocidade do ar

Modelo	T (°C)	v (m/s)	Parâmetros dos modelos			
Midilli	40	0,5	k=0,0467	a=0,9794	n=0,9470	b=-0,0005
	40	1	k=0,0753	a=0,9949	n=0,8862	b=-0,0024
	40	1,5	k=0,0393	a=0,9611	n=0,8948	b=-0,0007
	50	0,5	k=0,1298	a=1,0144	n=0,9467	b=0,0001
	50	1	k=0,1000	a=1,0061	n=0,8397	b=-0,0015
	50	1,5	k=0,0694	a=0,9553	n=0,9163	b=-0,0030
Midilli Modificado	40	0,5	k=0,0546	n=0,9031	b=-0,0006	
	40	1	k=0,0778	n=0,8754	b=-0,0024	
	40	1,5	k=0,0552	n=0,8014	b=-0,0010	
	50	0,5	k=0,1224	n=0,9656	b=0,0001	
	50	1	k=0,0965	n=0,8515	b=-0,0015	
	50	1,5	k=0,0956	n=0,8043	b=-0,0039	
Page	40	0,5	k=0,0488	n=0,9564		
	40	1	k=0,0570	n=1,0421		
	40	1,5	k=0,0427	n=0,9138		
	50	0,5	k=0,1240	n=0,9575		
	50	1	k=0,0793	n=0,9573		
	50	1,5	k=0,0647	n=1,0277		
Henderson e Pabis	40	0,5	k=0,0409	a=0,9708		
	40	1	k=0,0643	a=0,9968		
	40	1,5	k=0,0295	a=0,9451		
	50	0,5	k=0,1109	a=0,9893		
	50	1	k=0,0678	a=0,9674		
	50	1,5	k=0,0682	a=0,9746		
Wang e Singh	40	0,5	a=-0,0303	b=0,0002		
	40	1	a=-0,0479	b=0,0006		
	40	1,5	a=-0,0245	b=0,0002		
	50	0,5	a=-0,0510	b=0,0005		
	50	1	a=-0,0510	b=0,0007		
	50	1,5	a=-0,0523	b=0,0007		
Thompson	40	0,5	a=-35,1144	b=1,2388		
	40	1	a#####	b=13,5900		
	40	1,5	a=-19,5218	b=0,8174		
	50	0,5	a=-14,8858	b=1,3357		
	50	1	a=-51,2020	b=1,9091		
	50	1,5	a#####	b=14,3401		
	40	0,5	k=0,0425	a=0,9995		

Exponencial de Dois Termos	40	1	k=0,0645	a=1,0001				
	40	1,5	k=0,4838	a=0,0606				
	50	0,5	k=7,8302	a=0,0141				
	50	1	k=0,0702	a=1,0004				
	50	1,5	k=0,0700	a=0,9997				
Logarítmico	40	0,5	k=0,0384	a=0,9875	b=-0,0248			
	40	1	k=0,0506	a=1,0537	b=-0,0937			
	40	1,5	k=0,0265	a=0,9772	b=-0,0443			
	50	0,5	k=0,1165	a=0,9833	b=0,0152			
	50	1	k=0,0617	a=0,9832	b=-0,0317			
	50	1,5	k=0,0497	a=1,0631	b=-0,1316			
Dois Termos	40	0,5	k=0,0409	g=0,0409	a=0,9295	b=0,0413		
	40	1	k=0,0927	g=0,0915	a=-31,7774	b=32,7346		
	40	1,5	k=0,0386	g=0,0376	a=-9,5789	b=10,5130		
	50	0,5	k=0,0496	g=0,1307	a=0,1377	b=0,8697		
	50	1	k=0,0678	g=0,0678	a=0,2022	b=0,7652		
	50	1,5	k=0,1053	g=0,1040	a=-42,6212	b=43,5385		
Verma et al	40	0,5	k=1,8173	g=0,0407	a=0,0333			
	40	1	k=0,0865	g=0,0849	a=-16,3017			
	40	1,5	k=5,6913	g=0,0294	a=0,0577			
	50	0,5	k=0,1258	g=0,0428	a=0,9016			
	50	1	k=0,9390	g=0,0667	a=0,0487			
	50	1,5	k=0,0932	g=0,0917	a=-18,3128			
Hii et al	40	0,5	k=0,0747	g=0,0787	a=8,1214	n=0,9239	b=-7,1483	
	40	1	k=0,0784	g=0,0761	a=-11,7252	n=1,0391	b=12,6783	
	40	1,5	k=0,0259	g=0,0259	a=0,6260	n=1,0332	b=0,3080	
	50	0,5	k=0,0521	g=0,1357	a=0,3662	n=1,0825	b=0,6283	
	50	1	k=0,2344	g=0,0180	a=0,2477	n=1,3546	b=0,7416	
	50	1,5	k=0,0740	g=0,0720	a=-13,4902	n=1,0872	b=14,4002	
Henderson e Pabis Modificado	40	0,5	k=0,0409	g=0,0409	h=0,0409	a=0,5913	b=0,0276	c=0,3519
	40	1	k=0,0218	g=-0,0061	h=0,0957	a=0,6952	b=-0,2028	c=0,4901
	40	1,5	k=0,0921	g=0,0601	h=0,0454	a=1,2343	b=-4,3301	c=4,0595
	50	0,5	k=0,0496	g=0,1307	h=0,1307	a=0,1377	b=0,5358	c=0,3339
	50	1	k=0,0830	g=0,0818	h=0,0819	a=-15,3869	b=7,2270	c=9,1176
	50	1,5	k=0,1054	g=0,1037	h=0,1040	a=-35,6032	b=11,3309	c=25,1897
Aproximação da Difusão	40	0,5	k=1,7955	a=0,0334	b=0,0227			
	40	1	k=0,0858	a=-93,3750	b=0,9967			
	40	1,5	k=4,2911	a=0,0580	b=0,0068			
	50	0,5	k=0,0428	a=0,0986	b=2,9398			
	50	1	k=0,9387	a=0,0487	b=0,0711			
	50	1,5	k=0,0926	a=-91,4634	b=0,9967			
Gomper	40	0,5	a=-0,0248	b=0,9875	c=26,0328			
	40	1	a=-0,0937	b=1,0537	c=19,7576			

	40	1,5	a=-0,0443	b=0,9772	c=37,7736
	50	0,5	a=0,0152	b=0,9833	c=8,5815
	50	1	a=-0,0317	b=0,9832	c=16,2027
	50	1,5	a=-0,1317	b=1,0631	c=20,1068
Newton	40	0,5	k=0,0425		
	40	1	k=0,0645		
	40	1,5	k=0,0321		
	50	0,5	k=0,1122		
	50	1	k=0,0702		
	50	1,5	k=0,0700		

Fonte: O autor.

Tabela 5 – Valores estatísticos ajustados dos modelos matemáticos, incluindo a análise de tendência da distribuição de resíduos (A = aleatória; T = tendenciosa), para os 6 tratamentos, sendo T a temperatura e v a velocidade do ar

Modelo	T (°C)	v (m/s)	R <sup>2</sup>	P	SE	Tendência
Midilli	40	0,5	0,9999	2,7436	0,0032	T
	40	1,0	0,9998	9,2227	0,0051	A
	40	1,5	0,9997	5,3610	0,0065	A
	50	0,5	0,9997	8,6703	0,0064	A
	50	1,0	0,9998	2,2568	0,0058	A
	50	1,5	0,9995	4,3370	0,0083	A
Midilli Modificado	40	0,5	0,9998	4,4977	0,0049	T
	40	1,0	0,9998	3,7245	0,0051	A
	40	1,5	0,9994	5,2969	0,0076	A
	50	0,5	0,9997	9,5225	0,0069	A
	50	1,0	0,9998	4,4578	0,0058	A
	50	1,5	0,9992	6,1114	0,0105	A
Page	40	0,5	0,9993	6,8764	0,0109	T
	40	1,0	0,9969	16,2659	0,0213	T
	40	1,5	0,9975	8,9441	0,0199	T
	50	0,5	0,9996	30,0427	0,0075	A
	50	1,0	0,9981	11,5206	0,0159	A
	50	1,5	0,9947	15,1212	0,0273	T
Henderson e Pabis	40	0,5	0,9996	5,9018	0,0080	T
	40	1,0	0,9966	16,8352	0,0224	T
	40	1,5	0,9988	7,1774	0,0134	T
	50	0,5	0,9994	54,6973	0,0095	A
	50	1,0	0,9984	10,5805	0,0146	A
	50	1,5	0,9950	16,3125	0,0266	T
Wang e Singh	40	0,5	0,9808	37,0029	0,0561	T

	40	1,0	0,9901	24,3052	0,0380	T
	40	1,5	0,9793	22,0617	0,0567	T
	50	0,5	0,7752	-46,6723	0,1681	T
	50	1,0	0,9806	32,8119	0,0508	T
	50	1,5	0,9892	20,2079	0,0393	T
Thompson	40	0,5	0,9990	6,7429	0,0130	T
	40	1,0	0,9966	16,8188	0,0224	T
	40	1,5	0,9963	9,2175	0,0240	T
	50	0,5	0,9998	9,9443	0,0053	A
	50	1,0	0,9978	10,8504	0,0173	A
	50	1,5	0,9945	15,9080	0,0279	T
Exponencial de Dois Termos	40	0,5	0,9989	6,0694	0,0135	T
	40	1,0	0,9966	16,8178	0,0224	T
	40	1,5	0,9986	7,3754	0,0147	T
	50	0,5	0,9994	53,1393	0,0094	A
	50	1,0	0,9978	10,3773	0,0174	A
	50	1,5	0,9945	15,9067	0,0277	T
Logarítimo	40	0,5	0,9998	2,8964	0,0053	T
	40	1,0	0,9994	9,1348	0,0092	T
	40	1,5	0,9994	5,7129	0,0096	T
	50	0,5	0,9997	9,7097	0,0064	A
	50	1,0	0,9990	6,4910	0,0118	A
	50	1,5	0,9994	4,8259	0,0094	A
Dois Termos	40	0,5	0,9996	5,9018	0,0080	T
	40	1,0	0,9978	15,0133	0,0178	T
	40	1,5	0,9990	6,3566	0,0122	T
	50	0,5	0,9999	5,2357	0,0041	A
	50	1,0	0,9984	10,5805	0,0146	A
	50	1,5	0,9976	12,0368	0,0185	T
Verma et al	40	0,5	0,999672	5,9279789	0,0073444	T
	40	1,0	0,997225	15,780103	0,0201127	T
	40	1,5	0,998973	7,1641374	0,0126887	T
	50	0,5	0,9999	5,9250	0,0043963	A
	50	1,0	0,9986	10,9459	0,0135212	A
	50	1,5	0,9952	14,0767	0,0259728	T
Hii et al	40	0,5	0,999734	5,0403458	0,0066187	T
	40	1,0	0,997852	14,916296	0,0176989	T
	40	1,5	0,998918	6,6856354	0,0130216	T
	50	0,5	0,9997	6,5166	0,0032248	A
	50	1,0	0,9997	6,2896	0,0061421	A
	50	1,5	0,9977	11,4338	0,0181611	T
Henderson e Pabis Modificado	40	0,5	0,999611	5,9018114	0,0080014	T

	40	1,0	0,999851	21,586218	0,0045602	A
	40	1,5	0,999631	5,2969169	0,0076046	T
	50	0,5	0,9999	5,2359	0,0040740	A
	50	1,0	0,998521	9,5515535	0,0140887	A
	50	1,5	0,9976	12,0429	0,0186594	T
Aproximação da Difusão	40	0,5	0,999672	5,9288956	0,0073445	T
	40	1,0	0,997226	15,779447	0,2898480	T
	40	1,5	0,998971	7,1705838	0,0126951	A
	50	0,5	0,9999	5,9193	0,0043964	A
	50	1,0	0,9986	10,9461	0,0135213	A
	50	1,5	0,9952	14,0808	0,0259723	T
Gomper	40	0,5	0,999827	2,8963353	0,0053284	T
	40	1,0	0,999414	9,1347431	0,0092469	T
	40	1,5	0,999412	5,7129577	0,0095982	A
	50	0,5	0,9997	9,7098	0,0063964	A
	50	1,0	0,9990	6,4912	0,0117705	A
	50	1,5	0,9994	4,8257	0,0261341	A
Newton	40	0,5	0,998891	5,4031719	0,0135215	T
	40	1,0	0,996557	16,817833	0,0224008	T
	40	1,5	0,9957892	8,76014039	0,0256720	T
	50	0,5	0,9993	59,8942	0,0099164	A
	50	1,0	0,9978	10,3773	0,01736785	A
	50	1,5	0,9945	15,9067	0,0275367	T

Fonte: O autor.

De acordo com Madamba, Dircoll e Buckle (1996), a análise de um único parâmetro não representa uma ferramenta adequada para a avaliação de modelos matemáticos não lineares, sendo necessária uma análise conjunta dos parâmetros de coeficiente de determinação ( $R^2$ ), desvio padrão da estimativa (SE) e erro médio relativo (P).

Dessa forma, para verificar se um modelo é adequado para um processo, valores de  $R^2$  superiores a 95% e de P inferiores a 10 indicam uma representação satisfatória do processo de secagem, sendo recomendados para a seleção dos modelos, conforme Kashaninejad et al. (2007). Contudo, a análise de SE é inversamente proporcional para determinar a fidelidade de um processo, visto que quanto menor o valor do desvio padrão da estimativa, mais confiável é o modelo na situação analisada, segundo Draper e Smith (1998).

Entretanto, em caso de diversos modelos representarem de forma satisfatória o fenômeno da secagem, deve-se avaliar também a complexidade de cada modelo e a análise da distribuição de resíduos. Assim, quanto mais próximo da linha horizontal estiverem os valores

residuais, melhor é o ajuste do modelo, desde que não formem figuras definidas. Nesse caso, o modelo é considerado aleatório, caso contrário, considera-se tendencioso. Apesar da sua subjetividade, essa análise representa um indicativo satisfatório do ajuste do modelo aos valores experimentais.

Todos os 15 modelos empregados neste trabalho (Midilli, Midilli Modificado, Page, Henderson e Pabis, Henderson e Pabis Modificado, Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Logarítimo, Newton, Wang e Singh, Thompson, Verma et al., Hii et al., Aproximação da Difusão e Gomper), com exceção do Wang e Singh, apresentaram  $R^2 > 99,45\%$ , os quais são considerados valores aceitáveis para descrever o comportamento da secagem. Ao verificar o critério do erro médio relativo para um ajuste aceitável, a maioria dos resultados obtidos apresentaram  $P > 10$ , sendo apenas os modelos de Midilli, Midilli Modificado, Logarítimo e Gomper com valores de erro médio relativo inferiores a 10, conforme o recomendado. O Apêndice A apresenta os valores das constantes e parâmetros de cada um dos quatro modelos.

Dentre os quatro modelos, apenas os de Midilli e Midilli Modificado apresentaram os melhores ajustes. Esses modelos obtiveram, em média, os maiores valores de coeficiente de determinação ( $R^2 > 99,98\%$ ) e os menores valores de erro médio relativo e desvio padrão da estimativa ( $P < 3,72$  e  $SE < 0,0049$ ).

Ao verificar a análise da distribuição de resíduos obteve-se uma conformidade com os resultados estatísticos encontrados, considerando os seis tratamentos adotados. Portanto, os modelos de Midilli e Midilli Modificado apresentaram maior aleatoriedade na distribuição dos resíduos, indicando-os como os modelos mais apropriados para a descrição do comportamento da secagem de cerejas de café nas condições consideradas (Apêndice A). Dessa forma, devido ao menor número de parâmetros e pela simplicidade da equação, o modelo de Midilli Modificado foi o selecionado para descrever a cinética de secagem das cerejas de café analisadas com teor de água inicial médio de 66% (b.u).

Sendo assim, as equações que descrevem a secagem de café cereja, Bourbon amarelo, para cada um dos tratamentos, estão apresentadas na Tabela 6.

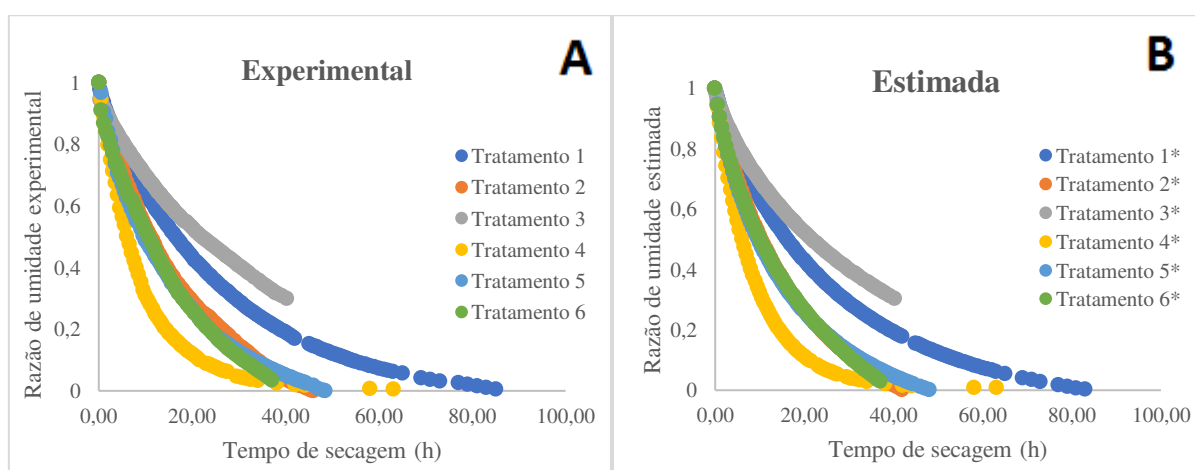
Tabela 6 – Equações ajustadas pelo modelo de Midilli Modificado que descrevem a secagem do produto, sendo RX a razão de secagem e t o tempo de secagem

Tratamento	Equação ajustada
1	$RX = \exp(-0,0546 * t^{0,9031}) + (-0,0006) t$
2	$RX = \exp(-0,0778 * t^{0,8754}) + (-0,0024) t$
3	$RX = \exp(-0,0552 * t^{0,8014}) + (-0,0010) t$
4	$RX = \exp(-0,1224 * t^{0,9656}) + (0,0001) t$
5	$RX = \exp(-0,0965 * t^{0,8515}) + (-0,0015) t$
6	$RX = \exp(-0,0956 * t^{0,8043}) + (-0,0039) t$

Fonte: O autor.

Dessa forma, a Figuras 5A e 5B apresentam o comportamento da razão de umidade obtida experimentalmente das cerejas de café comparando com a razão de umidade estimada pelo modelo de Midilli Modificado para os seis tratamentos estudados. Verifica-se que o modelo de Midilli Modificado fornece um ajuste adequado e semelhante aos valores experimentais, representando de forma precisa a cinética de secagem do produto.

Figura 5 – Gráficos comparativos entre a razão de umidade experimental (A) e estimada (B) ao longo do tempo de secagem para os seis tratamentos



Fonte: O autor.

A análise e avaliação sensorial da bebida, considerada como o teste de xícara, foi realizada por um provador treinado e credenciado pela SCA de acordo com a metodologia de classificação de qualidade dos cafés especiais da SCA. Os principais atributos avaliados foram adstringência, acidez, doçura e corpo da bebida, com pontuação geral na escala de 100 pontos. As amostras foram analisadas em menos de oito horas, após serem torradas, seguindo as

recomendações da instrução normativa nº 16 de 24 de maio de 2010. A Tabela 7 apresenta a equivalência da classificação SCA com classificação brasileira de acordo com a pontuação obtida e a Tabela 8 apresenta os resultados da análise sensorial dos tratamentos avaliados.

Tabela 7 – Equivalência da qualidade de bebida, considerando a classificação SCA e a classificação brasileira

<b>Pontuação SCA</b>	<b>Classificação SCA</b>	<b>Classificação Brasileira</b>
> 85 pontos	Excelente (especial)	Bebida estritamente mole
80 a 84 pontos	Muito bom (especial)	Bebida mole
75 a 79 pontos	Bom (especial)	Bebida apenas mole
70 a 74 pontos	Comum (não especial)	Bebida dura

Fonte: *Specialty Coffee Association*, 2009

Tabela 8 – Resultados da análise sensorial dos tratamentos avaliados na pesquisa, sendo N° da bebida, T a temperatura e v a velocidade do ar

<b>N°</b>	<b>T (°C)</b>	<b>v (m.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Nota</b>	<b>Bebida</b>	<b>Atributos</b>
1	40	0,5	84	Mole	Corpo/ Doce/ Intenso/ Retrogosto
2	40	1	83	Mole	Corpo/ Doce/ Intenso/ Retrogosto
3	40	1,5	87	Estritamente Mole	Doce/ Caramelo/Rapadura
4	50	0,5	83	Mole	Corpo/ Vinho/ Frutas vermelhas
5	50	1	82	Mole	Corpo intenso / Frutado
6	50	1,5	83	Mole	Corpo/ Doçura regular

Fonte: O autor.

A partir da Tabela 8 pode-se concluir que todos os tratamentos analisados agregaram valor à qualidade do produto final, obtendo pontuações e atributos que garantiram a classificação como cafés especiais. Entretanto, para a temperatura de secagem de 40°C com velocidade do ar de secagem de 1,5 m.s<sup>-1</sup> obteve-se a maior pontuação e, conseqüentemente, uma qualidade de bebida superior aos demais tratamentos. Portanto, o tratamento nº 3 destacou-se em relação aos demais.



## 5 CONCLUSÕES

Dentre os modelos testados, o modelo de Midilli Modificado foi o que melhor ajustou as equações de modelagem matemática para descrever o processo de secagem de café cereja (*Coffea arabica* L.), Bourbon amarelo, nos tratamentos submetidos, ou seja, com temperaturas de 40°C e 50°C e velocidades de ar de 0,5 m.s<sup>-1</sup>, 1,0 m.s<sup>-1</sup> e 1,5 m.s<sup>-1</sup>, utilizando um secador de leito fixo.

Após o teste de xícara, ao realizar a avaliação sensorial dos seis tratamentos, pôde-se concluir que todos obtiveram a classificação de café especial, e o tratamento 3 (temperatura de 40°C e velocidade do ar de 1,5 m.s<sup>-1</sup>) foi classificado com a nota mais alta, sendo considerado a bebida de melhor qualidade (estritamente mole).

Dentre os seis tratamentos analisados, concluiu-se que para uma temperatura de 50°C e velocidade do ar de 1,5 m.s<sup>-1</sup> obteve-se a secagem em um tempo mais curto. Para uma velocidade de 1,0 m.s<sup>-1</sup>, ao variar-se a temperatura, o comportamento das curvas foi semelhante, devido a um possível erro experimental, e para uma velocidade de ar de 0,5 m.s<sup>-1</sup>, a secagem para uma temperatura de 50°C ocorreu em menor tempo. Vale ressaltar que essa conclusão não inclui a análise de qualidade do produto, visto que se verifica apenas o tempo da secagem.

Por fim, após a realização desse trabalho, observou-se que as perspectivas futuras estão relacionadas com a Agricultura 4.0, a nova era da automatização de processos e a utilização de sistemas de Internet das Coisas (*IoT - Internet of Things*, em inglês) para tornar os processos remotos, auxiliando nas tomadas de decisões e tornando-os mais ágeis. Com isso, a tendência do mercado de café é o desenvolvimento de novas tecnologias para acelerar o processo de secagem e melhorar a qualidade do café, visto que esse é o parâmetro mais estudado e questionado na cafeicultura, além de gerar maior impacto na bebida final.

## 6 REFERÊNCIAS

- AKPINAR, E. K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 73, n.1, p. 75-84, Jan 2006.
- ANDRADE, E. T. et al. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. **Engevista**, São Paulo, SP, v. 8, n. 2, p. 83-95, 2006.
- BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. In: BORÉM, F. M. (Ed). **Pós-colheita do café**. Lavras: UFLA, 2008. p. 205-240.
- BORÉM, F. M. et al. Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. **Journal os Stored Products Research**, London, v. 54, n. 1, p. 1-6, 2013.
- BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). Instrução Normativa nº 8, de 11 de Junho de 2003. **Regulamento Técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado grão cru**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 13. jun. 2003. Seção 1, p. 22-29.
- BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Mapa/ACS. 2009. 395p.
- BROOKER, D. B. et al. **Drying cereal grains**. Westport: AVI, 1982.
- BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450 p.
- BURMESTER, K.; EGGERS, R. Heat and mass transfer during the coffee drying process. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 99, n. 4, p. 430-436, Aug, 2010.
- CAMPOS, A. T. **Desenvolvimento e análise de um protótipo de secador de camada fixa para café (*Coffea arabica* L.) com sistema de revolvimento mecânico**. Viçosa, MG: UFV, 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- CASTRO, L.H. **Efeito do despulpamento, em secador de leito fixo sob alta temperatura, no consumo de energia e na qualidade do café (*Coffea arabica* L.)**. 1991. 61 f. Dissertação (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 1991.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. 3º levantamento da safra 2020. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, v. 6, n. 3, p. 1-54, 2020.
- 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**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 181-188, 2008.
- CORADI, P. C. et al. Effect of drying and storage conditions on the quality of natural and washed coffee. **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 38-47, 2007.

- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; RIBEIRO D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.8, n.1, p. 1-10, 2006.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, p.501-507, 2007.
- CORRÊA, P. C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v.57, n. 5, p. 595-601, 2010.
- DI SCALA, K.; CRAPISTE, G. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, London, v.41, n. 5, p. 789-795, June, 2008.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.  
DIOCLECIANO, J. M. **Colheita, secagem e preparo do café**. 2018.
- GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. Secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p.603-608, 2004.
- GIOMO, G. S; BORÉM, F. M. Cafés especiais no Brasil: opção pela qualidade. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 261, p. 7-16, mar./abr. 2011.
- GIRANDA, R.N. **Aspectos qualitativos de cafés submetidos a diferentes processos de secagem**. 1998. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 1998.
- GONELI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 11, p. 64-73, 2009. Edição especial café.
- HERNÁNDEZ-DÍAZ, A. et al. Modeling heat and mass transfer during drying green coffee beans using prolate spheroidal geometry. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 86, n. 1, p. 1-9, Jan 2008.
- IEA – INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. **Mercado de Café - Covid-19**. Junho, 2020. Disponível em: < <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=14803> >. Acesso em: 24 Nov. 2020.
- ISQUIERDO, E. P. **Cinética de secagem de café natural e suas relações com a qualidade para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar**. Lavras, MG: UFLA. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- ISQUIERDO, E. P. et al. Quality of natural coffee subjected to different rest periods during the drying process. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 36, n. 4, p. 439-445, jul./ago. 2012.

JUNIOR, P. S. S.; EVERTON, G. O.; FERREIRA, A. M.; MAFRA, N. S. C.; ROSA, P. V. S.; PEREIRA, A. P. M.; FONSECA, D.; CUNHA, J. C. R.; ARRUDA, M. O.; FILHO, V. E. M. Alterações físico-químicas e biológicas dos óleos essenciais das folhas *Alpinia zerumbet* a partir de diferentes temperaturas de secagem. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n. 4, p. 22392-22403 apr. 2020.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.98-108, 2007.

LINGLE, T. R. **The coffee cupper's handbook: systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor**. 3<sup>rd</sup> ed. Long Beach: Specialty Coffee Association of America, 2001. 66 p.

MARTINS, H. F.; CARVALHO, S. S. R. A.; BISPO, J. A. C.; SOUZA, S. M. A.; MARTINEZ, E. A. Maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* f. *Flavicarpa*): cinética da secagem artificial e natural da casca. **Brazilian Journal of Development**. v. 5, n. 10, p. 23234-23245, nov. 2019.

MELO, P. C. et al. Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**. Recife, PE. v. 11, n 3, 2016.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas, RS. Universitária, 2002, 206 p.

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

NILNONT, W. et al. Finite elemento simulation for coffee (*Coffea Arabica* L.) drying. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, 2011. In press.

OLIVEIRA, R. A.; Oliveira, W. P.; Park, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.181-189, 2006.

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

OLIVEIRA, P. D. **Microscopia eletrônica de varredura e aspectos fisiológicos associados à qualidade da bebida de café submetidos a diferentes métodos de processamento e secagem**. Lavras, MG: UFLA. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

OLIVEIRA, P. D. et al. Aspectos fisiológicos de grãos de café, processados e secados de diferentes métodos, associados à qualidade sensorial. **Coffee Science**, Lavras, v.8, n. 2, p. 211-220, 2013.

OCTAVIANI, J.C. **Secagem de café cereja descascado desmucilado com a utilização de GLP**. 2000. 120 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PALACIN, J. J. F.; LACERDA FILHO, A. F.; MELO, E. C.; TEIXEIRA, E. C. Secagem combinada de café cereja descascado. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 17, n.3, p.244-258, 2009.

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

REINATO, C. H. R.; BORÉM, F. M. Variação da temperatura e do teor de água do café em secador rotativo usando lenha e glp como combustíveis. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.2, p.561-569, maio/ago. 2006.

RESENDE, O. et al. Qualidade do café conilon submetido à secagem em terreiro híbrido e de concreto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.2, p. 327-335, mar./ abr. 2011.

RIBEIRO, F. C. et al. Storage of green coffee in hermetic packing injected with CO<sub>2</sub>. **Journal of Stored Products Research**, London, v.47, n. 4, p. 341-348, 2011.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L.; NOGUEIRA, R. M. **Secagem e Secadores**. In: JUAREZ DE SOUZA E SILVA (Ed.) Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa, MG. 2008. 109-146 p.

SILVA, J. de S.; LACERDA FILHO, A.F. de; BERBERT, P.A. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. In: SILVA, J. de S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: UFV, 2000. p.395-467.

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

SIQUEIRA, V. C; **Viabilidade técnica da secagem do café beneficiado com alto teor de água e seus impactos na qualidade**. Lavras, MG: UFLA. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SOUZA, A. P. **A cadeia produtiva do café: uma análise da produção acadêmica brasileira e o impacto da denominação de origem do café na criação de vantagem competitiva da Região do Cerrado Mineiro**. Uberlândia, MG: UFU, 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SPECIALITY COFFEE ASSOCIATION - SCA. **SCA Protocols. Cupping Specialty Coffee**. Long Beach: SCA, 2009. 7 p.

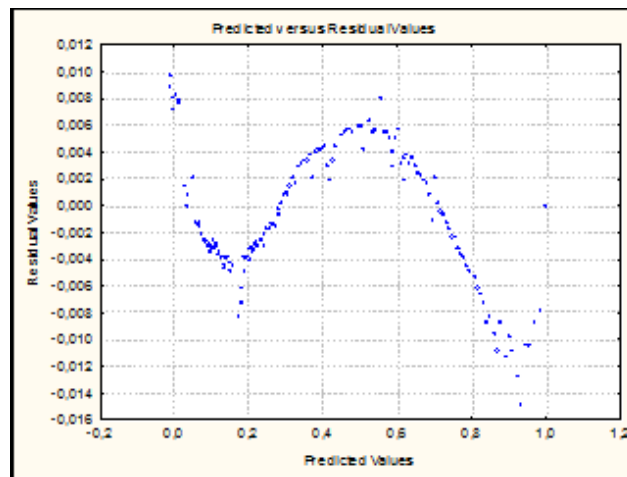
TAVEIRA, J. H. S. **Aspectos fisiológicos e bioquímicos associados à qualidade da bebida de café submetido a diferentes métodos de processamento e secagem**. Lavras, MG. UFLA: 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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

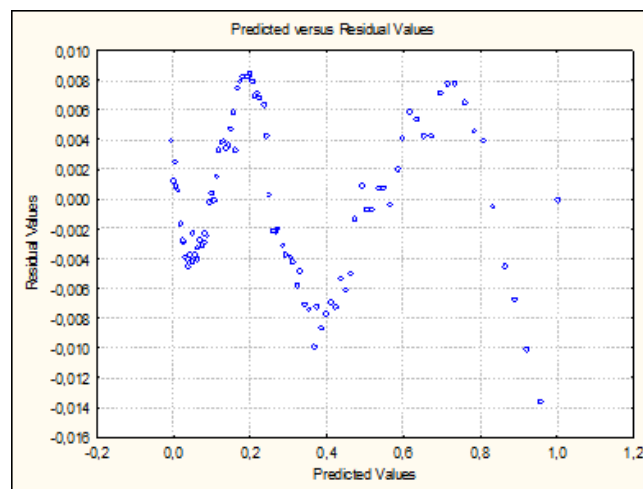
## 7 APÊNDICE

### A Gráficos da distribuição de resíduos de cada tratamento para o modelo de Midilli Modificado

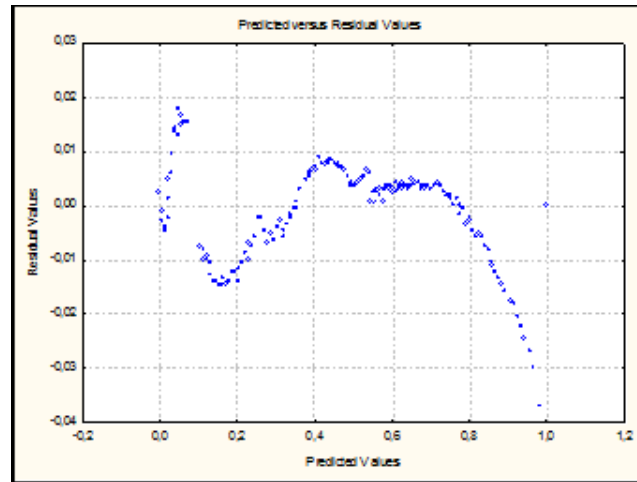
- Tratamento 1:



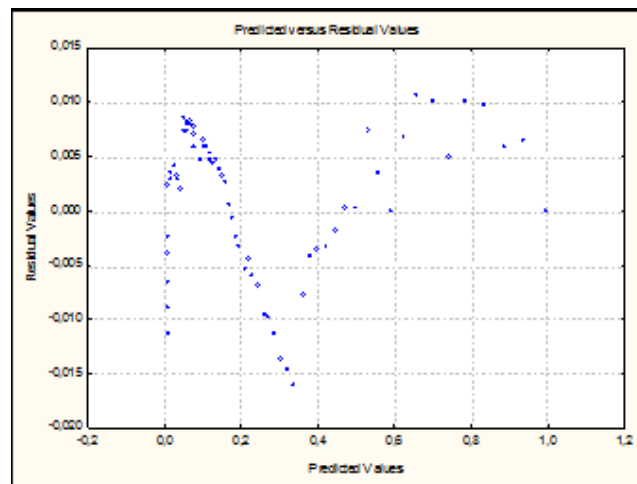
- Tratamento 2:



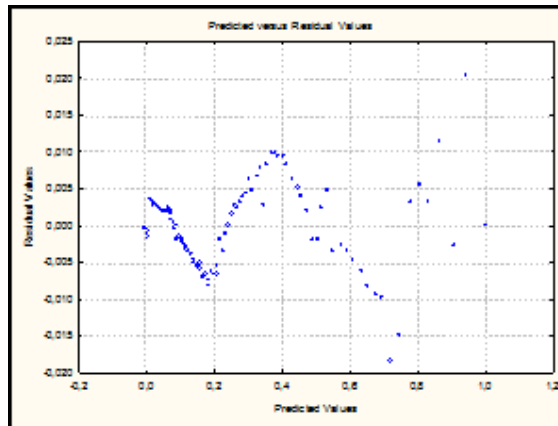
- **Tratamento 3:**



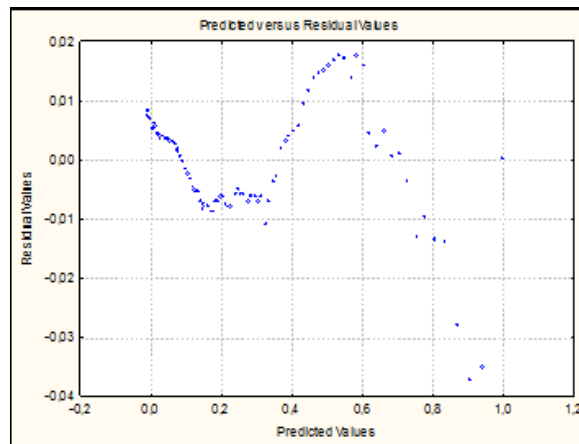
- **Tratamento 4:**



- **Tratamento 5:**



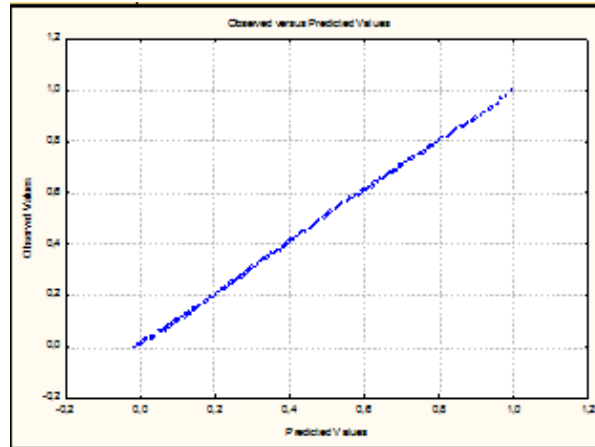
- **Tratamento 6:**



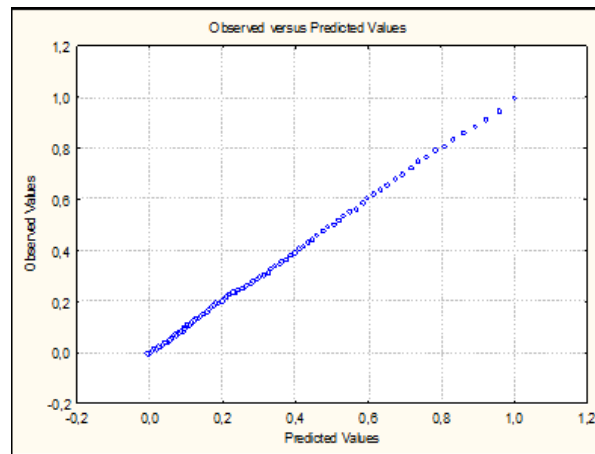
**B Gráficos relacionando os valores de razão de umidade observada pela predita em cada tratamento para o modelo de Midilli Modificado**



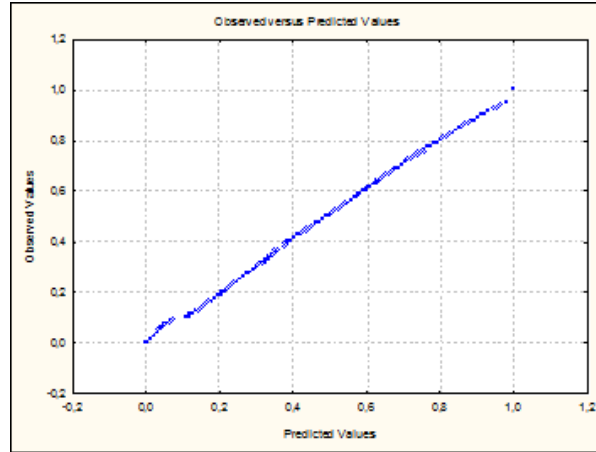
- **Tratamento 1:**



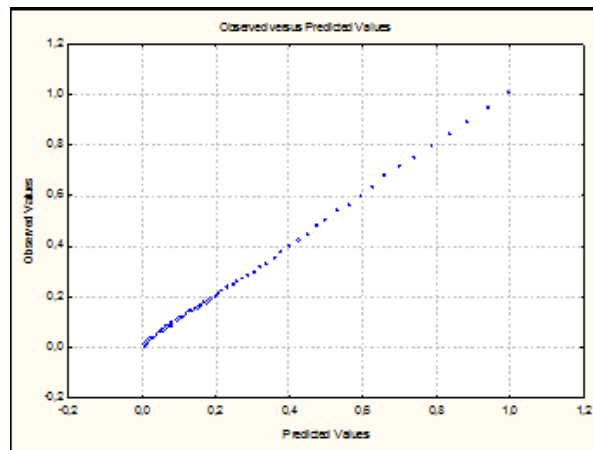
- **Tratamento 2:**



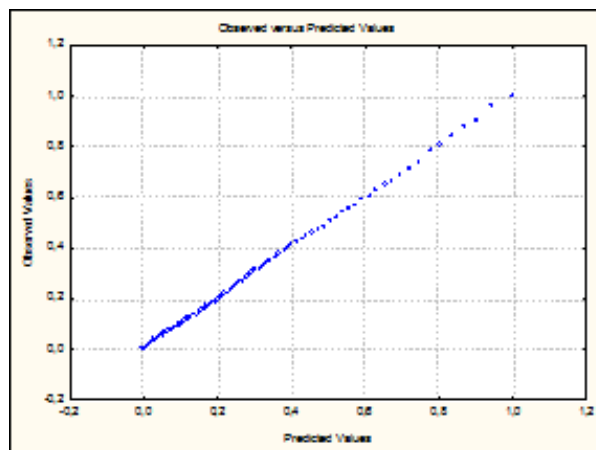
- **Tratamento 3:**



- **Tratamento 4:**



- **Tratamento 5:**



- **Tratamento 6:**

