



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS



PRISCILA CRISTINA CORREIA MAIA

EFEITO DA FERMENTAÇÃO NA QUALIDADE DA BEBIDA DE CAFÉS DE
PRIMEIRA COLHEITA

Patos de Minas

2024

PRISCILA CRISTINA CORREIA MAIA

EFEITO DA FERMENTAÇÃO NA QUALIDADE DA BEBIDA DE CAFÉS DE
PRIMEIRA COLHEITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Thomás Valente de
Oliveira

Coorientadora: Dr^a. Livia Carneiro Fidélis
Silva

Patos de Minas

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br



HOMOLOGAÇÃO Nº 113

PRISCILA CRISTINA CORREIA MAIA

Efeito da fermentação na qualidade da bebida de cafés de primeira colheita

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado nesta data para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - *campus* Patos de Minas (MG) pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Thomás Valente de Oliveira

Orientador - UFU

Prof.ª Dr.ª Lívia Carneiro Fidélis Silva

Coorientadora - UFU

Prof.ª Dr.ª Líbia Diniz Santos

UFU

Dr.ª Renata Abadia Reis Rocha

UFU

Patos de Minas, 24 de abril de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Thomás Valente de Oliveira, Presidente**, em 24/04/2024, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Libia Diniz Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/04/2024, às 12:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lívia Carneiro Fidélis Silva, Usuário Externo**, em 24/04/2024, às 12:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Abadia Reis Rocha, Usuário Externo**, em 24/04/2024, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5365957** e o código CRC **76F02A4A**.

Dedico este trabalho aos meus avôs, pais e esposo por todo esforço, dedicação e compreensão, pois sem eles eu não teria conseguido seguir por esta caminhada. E sem dúvidas ao meu filho, minha motivação diária, minha razão de viver.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível graças ao apoio e colaboração de muitas pessoas, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, cuja orientação e força espiritual me sustentaram durante toda essa jornada. Sua presença me deu coragem e resiliência para enfrentar e superar cada obstáculo.

Gostaria também de agradecer ao meu orientador, Professor Thomás, por sua infinita paciência e constante incentivo. Sua orientação foi vital para o desenvolvimento deste trabalho, e sua disposição em me ajudar em todas as etapas foi fundamental para que eu não desistisse nos momentos mais difíceis. Sou profundamente grata por sua sabedoria, apoio e pela confiança que depositou em mim.

Meus agradecimentos também vão para o grupo Da Semente à Xícara, que generosamente forneceram os dados necessários para a realização da pesquisa. A colaboração de vocês foi essencial para enriquecer este trabalho e garantir que os resultados alcançados fossem significativos e relevantes.

Agradeço de coração aos meus avós, pais, esposo e ao meu filho, que foram meu alicerce ao longo deste período. Seu amor, apoio e encorajamento foram indispensáveis para que eu pudesse superar os desafios e manter a motivação até o fim. Cada palavra de incentivo e gesto de apoio de vocês teve um impacto inestimável no sucesso deste trabalho.

A todos, meu sincero agradecimento. Este trabalho é o resultado de um esforço coletivo e do carinho e apoio que recebi de cada um de vocês.

Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso!
Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu
Deus, estará com você por onde você andar".
(Josué 1:9)

RESUMO

Este trabalho investigou o impacto da fermentação em diferentes processos na qualidade da bebida de cafés de primeira colheita, com foco na variedade Paraíso. O estudo empregou café cultivado na Fazenda Reserva Heitor, em Patos de Minas, Minas Gerais, Brasil, durante a safra 2022/2023. Os cafés foram submetidos a diversos métodos de fermentação e avaliados por *Q-Graders* certificados, seguindo os protocolos da *Specialty Coffee Association* (SCA). Os resultados mostraram que todos os tratamentos, incluindo o controle, foram classificados como cafés especiais, com pontuações acima de 80, indicando a eficácia dos processos fermentativos em melhorar a qualidade sensorial do café de primeira colheita. Não foram observadas interações significativas entre os fatores ambientais, controle de temperatura e tempo de fermentação. No entanto, a análise de cada fator individualmente revelou que a fermentação em ambiente seco resultou em cafés especiais com pontuações mais altas em comparação com a fermentação submersa. Além disso, constatou-se que a implementação de controle de temperatura durante a fermentação não aumentou as notas sensoriais significativamente. Por outro lado, os resultados demonstraram que fermentações longas, especialmente de 72 horas, também resultam em bebidas de maior qualidade. Esses resultados destacam a importância da fermentação na produção de cafés especiais de alta qualidade, mesmo sendo de primeira colheita, fornecendo *insights* valiosos para aprimorar o controle do processo e promover maior reprodutibilidade dos resultados. Em última análise, este estudo reforça a posição da variedade Paraíso como uma excelente opção para a obtenção de cafés superiores, enriquecendo o cenário da produção de cafés especiais.

Palavras-chave: Café especial, fermentação, produção de café, variedade Paraíso.

ABSTRACT

This study investigated the impact of fermentation on different processes in the quality of first harvest coffee drinks, focusing on the Paraíso variety. The research used coffee grown at Fazenda Reserva Heitor, in Patos de Minas, Minas Gerais, Brazil, during the 2022/2023 crop season. The coffees were subjected to various fermentation methods and evaluated by certified Q-Graders, following the protocols of the Specialty Coffee Association (SCA). The results showed that all treatments, including the control, were classified as specialty coffees, with scores above 80, indicating the effectiveness of the fermentative processes in improving the sensory quality of the first harvest coffee. No significant interactions were observed between environmental factors, temperature control, and fermentation time. However, analyzing each factor individually revealed that dry environment fermentation resulted in specialty coffees with higher scores compared to submerged fermentation. Furthermore, it was found that implementing temperature control during fermentation did not increase sensory scores significantly. On the other hand, the results demonstrated that long fermentations, especially those lasting 72 hours, also result in higher quality beverages. These findings highlight the importance of fermentation in the production of high-quality specialty coffees, even being from the first harvest, providing valuable insights to enhance process control and promote greater reproducibility of results. Ultimately, this study reinforces the position of the Paraíso variety as an excellent option for obtaining superior coffees, enriching the specialty coffee production landscape.

Keywords: Special coffee, fermentation, coffee production, Paraíso variety.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
3	REVISÃO DE LITERATURA	10
3.1	Beneficiamento do café após a colheita	10
3.1.1	Etapas de fermentação do café	12
3.2	Métodos de processamento de fermentação de café	13
3.2.1	Disponibilidade de oxigênio no processo fermentativo	14
3.2.1.1	Fermentação em ambiente aberto	14
3.2.1.2	Fermentação anaeróbica	15
3.2.1.3	Fermentação anaeróbica auto-induzida (SIAF)	16
3.2.2	Adição de água no processo fermentativo	18
3.2.3	Condições de processamento e relação microbiota	20
3.2.3.1	Fermentação espontânea	20
3.2.3.2	Utilização de culturas iniciadoras	23
3.3	Tratamento dos frutos de café no processo fermentativo	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	Planejamento experimental e classificação	27
4.2	Análise Sensorial	28
4.3	Análise de dados	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

O café, como uma das culturas mais significativas e economicamente relevantes no mundo (BASTIAN et al., 2021), ocupando um papel crucial no mercado global. Segundo a Organização Internacional do Café (2022), a produção mundial de café Arábica em 2020 atingiu 105.262 mil sacas de 60 kg, refletindo um aumento de 13,7% em relação ao ano anterior. O Brasil, como principal produtor e exportador de café, registrou uma produção de 60.292 mil sacas de 60 kg de café Arábica no mesmo período, representando um aumento significativo de 26% (HALL et al., 2022).

Conhecido por sua bebida aromática e saborosa, o café Arábica compõe 70% do mercado global (BATISTA, SOUZA, BATISTA & SCHWAN, 2016; HALL, TREVISAN & DE VOS, 2022). No contexto do mercado de café, o termo "café especial" refere-se a uma bebida de qualidade superior, caracterizada por um sabor e características únicas, em comparação com os cafés disponíveis a preços de commodities (MARTINEZ et al., 2021). Esta qualidade excepcional é um critério consolidado para acessar os mercados que melhor remuneram o valor agregado do produto.

A variedade Paraíso, desenvolvida pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) por meio do cruzamento entre Catuaí Amarelo IAC 30 e Híbrido de Timor UFV 445-46, é reconhecida por sua estatura reduzida, frutos amarelos, vigor vegetativo elevado, resistência à ferrugem, maturação precoce dos frutos e adaptação versátil a sistemas de cultivo irrigado e sequeiro. Esta variedade destaca-se, também, por sua excelente adequação a métodos de colheita, tanto manual quanto mecanizada (CULTIVAR, 2023).

Os cafeeiros da variedade Paraíso MG H 419-1 alcançam uma altura média de 1,95m após 72 meses de plantio, revelando um padrão de crescimento distinto em comparação com outras variedades. Devido ao seu porte compacto, são adequados para espaçamentos de 2 a 3,5 metros entre fileiras e de 0,5 a 1 metro entre plantas na fileira. Sua resistência à ferrugem-alaranjada-do-cafeeiro a torna uma opção ideal para a produção de café orgânico, facilitando tanto a colheita manual quanto a mecânica devido à sua estatura mais baixa, enquanto permite uma maior densidade de plantio (CULTIVAR, 2023).

Associação de Café Especial (SCA) estabeleceu metodologias padronizadas para avaliar a qualidade sensorial dos cafés, promovendo transações justas e atrativas entre compradores e produtores (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS & PINHEIRO, 2021). O método da SCA, conduzido por provadores certificados *Q-graders*, envolve uma análise sensorial que avalia

uma série de atributos do café, como fragrância, sabor, acidez, corpo e equilíbrio (SCA, 2018). Para ser considerado café especial, o café deve alcançar pelo menos 80 pontos na escala de classificação da SCA e apresentar um potencial diferenciado de aroma e sabor (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS & PINHEIRO, 2021).

A produção de café especial pode ser uma estratégia vantajosa para os produtores, pois esses cafés podem ser comercializados a preços substancialmente mais altos do que os cafés de commodities. Conforme destacado por Magalhães Júnior et al. (2021), cafés especiais podem ser vendidos por até US\$ 20/kg, em comparação com os US\$ 2,5/kg para os grãos de café de commodities. A crescente demanda por café especial reflete o interesse dos consumidores não apenas no sabor da bebida, mas também em sua origem, método de produção e sustentabilidade (EUROPEAN MARKET POTENTIAL FOR SPECIALITY COFFEE, 2020).

Nesse contexto, os produtores têm buscado estratégias para melhorar a qualidade e diferenciação sensorial de seus cafés, incluindo práticas pós-colheita inovadoras. A fermentação controlada, com o uso de culturas iniciadoras, tem sido apontada como uma técnica promissora para o desenvolvimento de sabores complexos e uniformidade do produto final (BRESSANI et al., 2021; BRIOSCHI JUNIOR et al., 2021; CARVALHO NETO et al., 2018; ELHALIS, COX, FRANK & ZHAO, 2020a; EVANGELISTA et al., 2014; PEREIRA et al., 2015; MARTINEZ et al., 2021; de PEREIRA et al., 2020; RIBEIRO, RIBEIRO et al., 2017).

A fermentação tem sido explorada como uma etapa-chave para o desenvolvimento de novos perfis sensoriais e para aumentar a pontuação final dos cafés especiais. Vários estudos têm investigado a influência de diferentes variáveis, como o tratamento do café, disponibilidade de oxigênio, adição de água e utilização de culturas iniciadoras, na qualidade sensorial do café especial. Uma compreensão aprofundada dessas variáveis permite aprimorar o processo de fermentação do café e promover maior controle sobre a qualidade da bebida final.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi examinar o impacto da fermentação em diferentes processos na qualidade da bebida de cafés da primeira colheita de uma lavoura convencional da variedade Paraíso.

De forma mais específica, objetiva-se:

- Analisar a influência de diversos métodos de fermentação na composição química e sensorial dos grãos de café Paraíso obtidos na primeira colheita, seguindo as diretrizes estabelecidas pela SCA;

- Investigar a relação entre as variáveis aplicadas à fermentação, como, por exemplo, tempo, temperatura e método de fermentação, e sua correlação com a qualidade final da bebida de cafés obtidos na primeira colheita.

- Ampliar o entendimento sobre o papel da fermentação na qualidade do café de primeira colheita, fornecendo informações relevantes para produtores, torrefadores e consumidores, e contribuindo para o progresso no campo da cafeicultura e do processamento de café.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Beneficiamento do café após a colheita

O processo de beneficiamento do café se inicia imediatamente após a colheita das cerejas de café, visando à transformação em grãos verdes (HAMEED et al., 2018; WU et al., 2022). Esse procedimento engloba a redução da umidade dos frutos e a remoção das camadas protetoras externas, como a casca, polpa, mucilagem e pele, com o intuito de conferir estabilidade e adequação para o armazenamento, transporte e posterior torrefação (BASTIAN et al., 2021; Hameed et al., 2018). A escolha do método de processamento após a colheita é crucial, pois afeta tanto os aspectos metabólicos internos do fruto do café quanto os fatores externos, como a ecologia microbiana e as condições de fermentação, resultando em modificações na composição bioquímica do café (LEE et al., 2015; PEREIRA et al., 2021). Dessa forma, o processo de beneficiamento é primordial na determinação da qualidade do café, influenciando desde as características de sabor e aroma até sua predominância na bebida final (HAMEED et al., 2018; PEREIRA et al., 2022; ZHANG et al., 2019).

Os procedimentos de beneficiamento do café para obtenção de grãos verdes podem ser categorizados em três tipos principais: úmido, seco e semi-seco, variando de acordo com a condição inicial do fruto (BASTIAN et al., 2021; LEE et al., 2015; SOCCOL et al., 2016). O processamento úmido compreende a remoção da casca do café, enquanto o método seco refere-se à secagem dos frutos inteiros do café em plataformas. Já o processamento semi-seco envolve a secagem do café descascado (BASTIAN et al., 2021; LEE et al., 2015; SOCCOL et al., 2016).

Além disso, o processo de processamento do café engloba diversas outras etapas, que podem variar conforme a infraestrutura da fazenda e a estratégia adotada pelo produtor.

Atualmente, a etapa de fermentação é considerada independente e ocorre após o tratamento dos frutos de café e antes da secagem. Como resultado, as definições tradicionais são limitadas e não conseguem abranger todos os parâmetros de processamento de forma clara e objetiva.

As etapas subsequentes na fazenda podem envolver a colheita, limpeza e separação, tratamento do café, fermentação e secagem. A colheita pode ser realizada manual ou mecanicamente, seguida pela lavagem dos frutos de café e a separação de impurezas (galhos, pedras e folhas). Como os frutos de café podem apresentar diferentes níveis de maturidade na mesma árvore, a lavagem é utilizada para separá-los conforme seu estágio de maturação, com base na densidade do fruto (imaturos, cerejas e passas/muito maduros). Posteriormente, cada tipo de café é processado separadamente, pois a seleção do nível apropriado de maturidade da cereja é crucial para a qualidade do processo de fabricação do café (PEREIRA, SOCCOL, BRAR, NETO E SOCCOL, 2017; BASTIAN et al., 2021; VALE et al., 2019).

Na etapa subsequente, o café pode ser processado em três formas distintas. Uma delas consiste nos frutos inteiros, denominados café natural. As outras formas são o café descascado e o café desmucilado, que são obtidos por meio de dois tratamentos diferentes. A remoção mecânica da casca e parte da mucilagem resulta no café descascado, enquanto a eliminação completa da mucilagem através da lavagem do café descascado origina o café desmucilado. Anteriormente, a fermentação era associada apenas ao processamento úmido. Dado que os frutos de café são ricos em umidade e açúcares, principalmente encontrados na mucilagem, é plausível afirmar que todos os frutos de café passam por algum processo de fermentação, devido à ação de microrganismos epifíticos em conjunto com o processamento (PEREIRA et al., 2021). Devido à alta disponibilidade do substrato, a fermentação pode ocorrer simultaneamente com a secagem ou ser realizada de forma induzida, antes da secagem, em uma etapa separada. A aplicação de fermentação induzida não é obrigatória. O propósito de conduzir a fermentação separadamente da secagem é proporcionar um ambiente controlado e promover reações bioquímicas favoráveis no café, devido ao metabolismo endógeno do fruto e ao desenvolvimento de microrganismos. A fermentação induzida pode ser conduzida utilizando café natural ou descascado, em biorreatores com ou sem água, com ou sem a adição de cultura iniciadora e sob diferentes condições de disponibilidade de oxigênio. Por fim, a secagem é realizada em terraços abertos (de cimento, asfalto ou suspensos) e/ou em secadores mecânicos até que os frutos atinjam 10–12% de umidade (HAMEED et al., 2018; PEREIRA et al., 2019).

3.1.1 Etapa de fermentação do café

A fermentação, um processo de degradação catabólica de substâncias orgânicas, especialmente açúcares, conduzido por bactérias e leveduras, desempenha um papel fundamental no processamento do café, levando à formação de compostos como etanol, ácido acético, ácido lático e ácido butírico no fruto (PEREIRA et al., 2021). No contexto do processamento do café, o termo "fermentação" é comumente usado para descrever o conjunto de reações do metabolismo microbiano que ocorre durante esse processo, com o mesocarpo do fruto atuando como fonte de energia. A fermentação dos frutos de café é um processo natural e complexo, que envolve uma variedade de microrganismos capazes de influenciar tanto positivamente quanto negativamente a qualidade final do produto (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS e PINHEIRO, 2021; SILVA et al., 2013). Um dos principais objetivos desse processo é a remoção da camada mucilagínosa, rica em polissacarídeos como a pectina, presente nos frutos de café (HALL et al., 2022; PEREIRA et al., 2019; SILVA et al., 2013).

Por exemplo, o café Arábica contém uma mucilagem que representa cerca de 2–5% do peso seco do fruto, com uma composição que inclui 94% de umidade, 4% de açúcar, 0,7% de proteína e 1–3% de pectina (G et al., 2019). Além de remover a mucilagem, a fermentação também é utilizada para alterar a composição dos grãos de café e desenvolver precursores de sabor (LEE et al., 2015). A diversidade de microrganismos presentes no café durante o processamento pós-colheita é influenciada pelo método de processamento utilizado (HAMDOUCHE et al., 2016; SOCCOL et al., 2016).

Os frutos de café fornecem substratos para o crescimento de bactérias, leveduras e fungos filamentosos, que utilizam uma variedade de componentes presentes nos frutos, como celulose, hemicelulose, pectina, açúcares redutores, sacarose, amido, óleos, proteínas, ácidos e cafeína (PEREIRA et al., 2021). Durante o processo de fermentação, esses microrganismos produzem uma série de enzimas e metabólitos que alteram a composição da polpa e da mucilagem, resultando em uma redução do pH e da atividade de água, o que favorece o crescimento microbiano (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS e PINHEIRO, 2021; BASTIAN et al., 2021).

O crescimento e os metabólitos produzidos durante a fermentação dependem do tipo de metabolismo celular, que pode ser aeróbico ou anaeróbico, dependendo da disponibilidade de oxigênio (PEREIRA et al., 2021). A respiração aeróbica favorece um maior crescimento microbiano, produzindo mais ATP, CO₂ e água, enquanto o metabolismo anaeróbico gera

menos ATP, mas produz uma maior variedade de subprodutos, como ácidos orgânicos e compostos voláteis, que contribuem para os perfis sensoriais do café.

A levedura *Saccharomyces cerevisiae*, comumente encontrada durante o processamento do café, é conhecida por produzir principalmente etanol em condições anaeróbicas, mas também pode gerar uma variedade de outros compostos em condições semi-anaeróbicas e aeróbicas, que contribuem para o sabor e aroma do café (GAMBACORTA et al., 2020).

Embora a fermentação seja essencial para o desenvolvimento de sabores distintos no café, sua falta de controle pode levar à formação de produtos indesejados, como ácidos butírico ou propiônico, e até mesmo micotoxinas, representando um desafio significativo para a segurança alimentar e a qualidade do produto (CARVALHO NETO et al., 2018; EVANGELISTA et al., 2014b; PEREIRA et al., 2021).

3.2 Métodos de processamento de fermentação de café

Sabe-se que o processamento pós-colheita do café ocorre em um ambiente não estéril, onde uma variedade de microrganismos é introduzida nos frutos do café ao longo da cadeia produtiva, originados do ambiente geográfico e das práticas de manipulação, incluindo solo, ar, equipamentos, pessoal e qualquer outra superfície que tenha contato físico com os frutos. A composição da microbiota, influenciada pelas condições ambientais e pelo controle do processo na fazenda, desempenha um papel crucial na definição das características de qualidade do café. A implementação de práticas adequadas de segurança alimentar e higiene em todas as etapas do processamento pode contribuir consideravelmente para aprimorar a qualidade do produto (PEREIRA et al., 2021).

O processo de fermentação do café é complexo e diversificado, sendo influenciado por vários fatores ambientais, como temperatura, pH, presença de água e composição da microbiota epifítica, além das características intrínsecas do fruto do café, como variedade e método de tratamento (natural ou despulpado) (BRESSANI et al., 2021; ELHALIS, COX, FRANK & ZHAO, EVANGELISTA et al. 2014; PEREIRA, SOCCOL, BRAR, NETO, & SOCCOL, 2017; RIBEIRO, MIGUEL, et al., 2017). O método de fermentação adotado influencia significativamente na concentração de oxigênio e, conseqüentemente, no metabolismo microbiano. A variação na presença de oxigênio durante a fermentação do café pode levar a alterações nos perfis sensoriais e ao desenvolvimento de diferentes sabores na bebida final. Os métodos de fermentação podem variar desde ambientes abertos até fechados, com ou sem a

inoculação de culturas iniciadoras, e podem ocorrer tanto em fermentação no estado sólido quanto submersa (PEREIRA et al., 2022).

As variáveis do processo de fermentação do café podem ser categorizadas em quatro aspectos principais: tipo de tratamento do fruto (natural ou despulpado), condições ambientais (disponibilidade de oxigênio), adição de água (fermentação no estado sólido ou submersa) e utilização de culturas iniciadoras. Com base nas diferentes combinações dessas variáveis, são identificados métodos distintos de condução da fermentação do café.

3.2.1 Disponibilidade de oxigênio no processo fermentativo

3.2.1.1 Fermentação em ambiente aberto

O método de processamento ao ar livre é uma abordagem tradicional e direta para o processamento do café, caracterizada por uma fermentação e secagem simultâneas. Após a colheita, os frutos são espalhados em plataformas ou no solo, sem a remoção prévia da polpa. Em seguida, o café é virado e disposto em camadas com aproximadamente 5-10 cm de espessura, sendo amontoado à noite e novamente espalhado a cada dia até que a umidade diminua para cerca de 12-11%. Esse processo pode se estender por um período de 10 a 25 dias, dependendo das condições ambientais, como temperatura e umidade (EVANGELISTA et al., 2014; PEREIRA, SOCCOL, BRAR, NETO & SOCCOL, 2017; PEREIRA et al., 2021).

Quando aplicado a cerejas de café naturais, esse processo é conhecido como método seco, não lavado ou natural. Por outro lado, quando o café é despulpado, o processo é denominado semi-seco (PEREIRA, SOCCOL, BRAR, NETO & SOCCOL, 2017; SOCCOL et al., 2016). Esse método de fermentação associado à secagem ao sol é prevalente em países tropicais, como Brasil e Etiópia, que contam com períodos prolongados de luz solar (LEE et al., 2015).

Durante a fermentação do café natural, os microrganismos têm acesso à mucilagem por meio de ações enzimáticas, como as enzimas pectinolíticas e celulolíticas produzidas por microrganismos epifíticos, que abrem os microporos na pele do fruto. Esse processo seco é geralmente uma fermentação espontânea realizada no solo ou em terraços suspensos, sendo que a diversidade bacteriana predominante é geralmente superior à diversidade de leveduras. No entanto, a microbiota pode ser alterada se o tratamento do café incluir um processo de lavagem para remover impurezas nas cerejas de café. A inoculação com microrganismos selecionados, como leveduras, durante os processos seco e semi-seco pode ser realizada pulverizando uma

solução de microrganismos enquanto o café natural ou despulpado é disposto nas plataformas de secagem. A inoculação pode até ser conduzida em uma etapa anterior à secagem, como uma forma de pré-fermentação. A pré-fermentação, realizada em recipientes de aço inoxidável, demonstrou melhorias na higiene durante o processo de fermentação do café, resultando em escores sensoriais mais elevados em ambos os processos de café natural e despulpado.

Embora o processamento ao ar livre possa resultar em cafés especiais de qualidade, sua principal vantagem é o baixo custo de implementação. No entanto, a falta de controle durante o processo representa sua maior desvantagem. A natureza da secagem lenta pode dificultar o controle, especialmente durante uma fermentação simultânea. Além disso, a contaminação no início do processo pode representar um desafio para a produção em larga escala de cafés especiais. Embora seja um método mais simples, o processamento seco pode se beneficiar do uso exclusivo de frutos maduros e da aplicação de pré-fermentação, promovendo uma qualidade sensorial mais consistente e distintiva na bebida final.

3.2.1.2 Fermentação anaeróbica

Na ausência de oxigênio, os microrganismos realizam a fermentação, transformando principalmente açúcares em energia e diversos produtos metabólicos, como etanol, CO₂ e ácidos orgânicos. Esse processo ocorre no citoplasma celular, impulsionado por enzimas catalisadoras (CROCOMO & GUTIERREZ, 2013; MAURICIO et al., 1997; PEREIRA et al., 2021). A fermentação anaeróbica tem sido amplamente utilizada no Brasil e na Tailândia para produzir cafés especiais em larga escala, com um método notável sendo a maceração carbônica. Neste método, cerejas de café inteiras são fermentadas em um ambiente sem oxigênio, o que leva à transformação dos açúcares e à modificação da cor e acidez da polpa (JITIAJOEN, 2021; PEREIRA et al., 2021).

Este processo pode ser conduzido com ou sem inoculação. A introdução de inóculos pode acelerar a degradação da mucilagem durante a fermentação do café, resultando em uma redução da viscosidade e um aumento nos açúcares simples, o que contribui para uma maior doçura na bebida final (JITIAJOEN, 2021). O controle preciso da temperatura é fundamental para garantir condições ideais para a atividade microbiana durante o processo de fermentação. Recomenda-se estratégias específicas de temperatura, como uma fermentação de pelo menos 4 dias a 36 °C ou de 6 a 8 dias a 26 °C (PEREIRA et al., 2021).

Brioschi Junior et al. (2021) realizaram um estudo utilizando sacos plásticos estéreis injetados com CO₂ para a fermentação espontânea de café da variedade Catuaí Vermelho. Diferentes combinações de tempo e temperatura de fermentação foram testadas, resultando em mudanças na composição da microbiota ao longo do tempo e com variações de temperatura. O processo de fermentação a 38 °C por 120 horas obteve a melhor pontuação sensorial (85,15), com compostos orgânicos como trigonelina, ácido fórmico, lipídios e γ -butirolactona contribuindo para a qualidade sensorial da bebida de café.

A utilização de métodos de restrição de oxigênio para promover a fermentação anaeróbica está se tornando mais comum entre os produtores de café. Essa técnica cria condições anaeróbicas nas quais a produção de energia celular é reduzida, afetando o crescimento microbiano e a produção de enzimas (PEREIRA et al., 2021). Como resultado, subprodutos como o etanol não apenas influenciam o desenvolvimento do sabor e da viscosidade da bebida, mas também atuam como solventes para compostos voláteis, contribuindo significativamente para as características sensoriais do café, conforme observado por Elhalis et al. (2020a).

A escassez de estudos sobre a fermentação anaeróbica no café é uma motivação para explorar o potencial desse método, especialmente em relação ao café descascado. Esta abordagem proporciona um ambiente mais estéril e favorece as condições de anaerobiose, inibindo o crescimento de microrganismos aeróbicos indesejados de forma eficaz. No entanto, sua implementação requer investimentos em biorreatores com controle de pressão e CO₂, adicionando uma camada de complexidade e custo. Portanto, apesar de seu potencial promissor, esse método precisa ser mais investigado antes de ser amplamente adotado na indústria do café.

3.2.1.3 Fermentação anaeróbica auto-induzida (SIAF)

A Fermentação Anaeróbica Autoinduzida (SIAF) surge como uma inovação na fermentação do café, descrita inicialmente por Mota et al. (2020), que utilizou biorreatores fechados de polietileno. Esse método, baseado na fermentação em ambiente hermético, sem adição de água (estado sólido), apresenta duas fases: aeróbica e anaeróbica, com a anaerobiose sendo gradualmente alcançada devido ao consumo de oxigênio pelos microrganismos e à geração de dióxido de carbono. Geralmente implementada em biorreatores de polietileno de pequeno porte (20-200 litros), a anaerobiose é induzida por uma válvula de bloqueio de ar, permitindo a saída controlada do CO₂ gerado, enquanto impede a entrada de oxigênio. Essa

abordagem é aplicável a cerejas de café naturais ou descascadas, com a homogeneização e o abastecimento do biorreator sendo realizados manualmente (MARTINEZ et al., 2021).

Esta tecnologia não só melhora o desempenho fermentativo de bactérias ácido lácticas (BAL) e leveduras, mas também aumenta a produção de metabólitos que enriquecem a qualidade sensorial do café (PEREIRA et al., 2022). O SIAF impacta positivamente o comportamento microbiano, resultando em cafés com maior intensidade do atributo frutado, além da presença notável de metabólitos como ácido clorogênico, sacarose, ácido lático e trigonelina (PEREIRA et al., 2022).

A temperatura dentro do biorreator é influenciada pela temperatura ambiente e tende a aumentar durante a fermentação (MARTINS et al., 2020). No contexto do método SIAF, o monitoramento da temperatura é crucial, pois o término da fermentação depende da estabilização térmica. Martinez et al. (2021) avaliaram o desempenho de biorreatores de aço inoxidável de 300 L, projetados para otimizar a produção de café especial sob condições de fermentação monitoradas. A instalação de termômetros permitiu o monitoramento contínuo da temperatura até o fim da fermentação. Os resultados indicaram que a variação térmica no reator diferiu com base no tratamento do café, afetando o tempo de fermentação: a fermentação do café natural demandou um período maior em comparação à do café descascado, 16 e 8 horas, respectivamente.

A utilização de biorreatores fechados promove um desempenho aprimorado das culturas de levedura iniciadoras. Variáveis como o tipo de café (natural ou descascado), a região de cultivo e a cepa dos microrganismos influenciam os resultados do método SIAF (BRESSANI et al., 2021; MOTA et al., 2020; MARTINEZ et al., 2021). Estudos mostram que a inoculação de diferentes cepas, como *S. cerevisiae* CCMA 0535 e *Torulaspora delbrueckii*, pode aumentar significativamente a pontuação sensorial do café, especialmente quando combinadas com o café natural (MARTINEZ et al., 2021; MOTA et al., 2020).

A aplicação do SIAF tem se mostrado promissora na produção de cafés especiais por meio de fermentação espontânea. A escolha cuidadosa do tratamento do café e da cepa de cultura iniciadora pode resultar em melhorias sensoriais notáveis, com aumentos significativos na pontuação SCA (MOTA et al., 2020). Um exemplo destacável foi observado em um café natural da variedade Bourbon Amarelo fermentado com *T. delbrueckii*, alcançando uma pontuação exemplar de 87,25 pontos (MOTA et al., 2020).

Embora o método SIAF ofereça uma solução acessível para produtores de todos os portes, algumas limitações devem ser consideradas. A falta de ferramentas de controle, como

sensores de pH e temperatura, pode comprometer a consistência do processo. Além disso, a ausência de dados sobre a concentração de oxigênio dentro do biorreator representa uma lacuna significativa, afetando a compreensão dos efeitos do oxigênio no metabolismo dos microrganismos. Investimentos em biorreatores mais avançados podem ser uma solução para superar essas limitações (MARTINEZ et al., 2021).

3.2.2 Adição de água no processo fermentativo

A fermentação submersa do café Arábica, conhecida como processo úmido, é uma prática tradicional que pode ser realizada tanto com café despulpado quanto com café natural (CASSIMIRO et al., 2022). Amplamente adotado em regiões de alta umidade, como Colômbia, América Central, Havaí e América do Sul, esse método envolve a remoção da casca e polpa das cerejas de café despulpadas, que são então fermentadas em tanques de água por um período que varia de 6 a 72 horas, dependendo da temperatura ambiente (HAMEED et al., 2018; LEE et al., 2018). Durante a fermentação, a homogeneização dos tanques pode ocorrer em intervalos regulares, com o término indicado pela completa degradação da mucilagem e a subsequente remoção dos grãos para secagem ao sol. Esse processo, realizado em tanques de cimento convencionais, pode ser conduzido em diferentes proporções de café despulpado para água, geralmente sem a especificação precisa do volume de água necessário.

A fermentação submersa proporciona um ambiente microaeróbio que gradualmente reduz a disponibilidade de oxigênio, favorecendo a homogeneização e acelerando a remoção da mucilagem, que é majoritariamente solúvel. Além disso, permite um maior controle do processo fermentativo, com a possibilidade de regular a taxa de aeração e as fases aeróbias e anaeróbias. Estudos como o de Carvalho Neto et al. (2018) demonstraram melhorias na qualidade sensorial do café ao conduzir a fermentação em biorreatores com condições controladas, mesmo sem inoculação, elevando a pontuação sensorial de 82,25 para 85,5 pontos.

O término da fermentação em café pode ser determinado pela queda do pH abaixo de 4,5 ou pela textura do pergaminho, que perde sua viscosidade e adquire uma sensação de maior aspereza devido à fricção entre os grãos. No entanto, esses métodos podem não abranger completamente as diversas reações bioquímicas que ocorrem no biorreator após a solubilização da mucilagem. O tempo de fermentação é crucial, pois afeta significativamente os compostos orgânicos voláteis totais. Não é aconselhável exceder 48 horas de fermentação devido à redução da atividade da enzima isocitrato liase, relacionada à formação desses compostos (BODNER et

al., 2019; RIBEIRO et al., 2018). Estudos mostraram que a prolongada fermentação resulta em diminuição dos compostos voláteis totais, ácidos e açúcares de baixo peso molecular, além de um aumento nos compostos fenólicos, o que não contribui para a qualidade do café (PENUELA-MARTÍNEZ et al., 2018).

O processo submerso oferece características sensoriais e composição distintas em comparação com os métodos em estado sólido. Proporciona um ambiente microaeróbio favorável ao desenvolvimento de uma ampla gama de grupos microbianos, incluindo bactérias ácido-láticas, ácido-acéticas, *Bacillus*, *Enterobacteriaceae*, leveduras e fungos filamentosos (ELHALIS et al., 2020a; PEREIRA et al., 2020; PEREIRA et al., 2021). A aplicação da fermentação submersa pode influenciar a pontuação final e o perfil sensorial do café, dependendo da variedade e da altitude. Os resultados obtidos com a fermentação submersa tendem a ser mais favoráveis em altitudes acima de 893 m, resultando em uma maior pontuação sensorial. No entanto, cafés produzidos em altitudes mais baixas podem apresentar melhores resultados em relação à produção de compostos orgânicos voláteis, especialmente com tempos de fermentação mais curtos (BODNER et al., 2019; EVANGELISTA et al., 2015; PEREIRA et al., 2020).

Resultados promissores foram alcançados ao aplicar a fermentação submersa do café com a inoculação de culturas iniciadoras. Estudos mostraram que a levedura *S. cerevisiae* melhorou a qualidade do café em altitudes mais baixas, sugerindo um potencial para aprimoramento da qualidade por meio da fermentação induzida (PEREIRA et al., 2020). Além disso, Pereira et al. (2015) descobriram que, quando inoculada, a levedura *Pichia fermentans* YC5.2 produziu uma bebida com corpo aveludado e sabor de caramelo. Em contraste, a bebida não inoculada apresentou notas sensoriais exóticas de damasco e banana passa, apesar de ambas alcançarem a mesma pontuação final de 89 pontos em testes de prova de xícara.

Outra estratégia promissora envolve o uso de bactérias como inoculantes na fermentação submersa. Carvalho Neto et al. (2018) obtiveram resultados significativos ao inocularem a bactéria ácido láctico *Lactobacillus plantarum*, que contribuiu para aumentar a formação de ácido láctico e compostos aromáticos voláteis durante a fermentação. Embora os tanques de cimento abertos usados no processamento submerso possam facilitar a contaminação pela microbiota natural, tanques fechados de aço inoxidável oferecem maior controle sobre o processo, permitindo uma limpeza mais eficiente, saneamento e controle de temperatura. A utilização de água durante a fermentação pode ser vantajosa para a homogeneização e transferência de calor, mas também pode aumentar o consumo de água durante a pós-colheita

e exigir investimentos mais elevados no tratamento de águas residuais. No entanto, são necessários mais estudos para avaliar as diferenças físico-químicas e sensoriais entre o processo submerso e o processo em estado sólido.

3.2.3 Condições de processamento e relação microbiota

Os microrganismos encontrados no café provêm de uma variedade de fontes, como água, solo, ar e planta, e são diversos, incluindo leveduras, fungos filamentosos e bactérias (LEE et al., 2015; PEREIRA et al., 2020; C. F. SILVA et al., 2013). Devido ao processo de processamento do café não ser estéril, a fermentação se torna complexa, caracterizada por uma sucessão de populações microbianas. O metabolismo desses microrganismos desempenha funções específicas nas reações bioquímicas dentro do grão, influenciando diretamente as características sensoriais do café (BREISSANI et al., 2021a; SOCCOL et al., 2016).

A composição da população microbiana total e as espécies predominantes durante a fermentação são influenciadas por vários fatores, como espécie/variedade de café, método de processamento, origem geográfica, altitude e condições climáticas (DONFRANCESCO et al., 2019; HAMEED et al., 2018; MARTINS et al., 2020; PEREIRA et al., 2021). Tanto a população inicial quanto a final de cada grupo microbiano podem variar dependendo da região e do tipo de processamento (PEREIRA, SOCCOL, BRAR, NETO, & Soccol, 2017). A fermentação pode ocorrer de forma espontânea, impulsionada pela microbiota epifítica. No entanto, o uso de culturas iniciadoras para melhorar a qualidade e como ferramenta de controle do processo tem sido extensivamente estudado.

3.2.3.1 Fermentação espontânea

Durante o processo de fermentação espontânea do café, a microbiota predominante é principalmente composta por microrganismos presentes naturalmente na planta e na superfície do fruto do café (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS e PINHEIRO, 2021; EVANGELISTA, MIGUEL, SILVA, PINHEIRO e SCHWAN, 2015). Esses microrganismos, em sua maioria, são endofíticos ou epifíticos, e sua diversidade e predominância variam durante o processo fermentativo (ELHALIS, COX E ZHAO, 2020; RIBEIRO et al., 2018). Fatores como temperatura, pH, aeração, homogeneização, variedade de café (Ribeiro et al., 2018), região, altitude (ELHALIS, COX e ZHAO, 2020; EVANGELISTA, MIGUEL, SILVA, PINHEIRO e

SCHWAN, 2015), e método de tratamento do café (natural ou descascado) (MARTINS et al., 2020) podem influenciar os microrganismos epifíticos e a microbiota dominante.

Essa influência resulta em cepas específicas encontradas em determinados países ou regiões. Por exemplo, no Brasil, a levedura *Saccharomyces spp.* é comumente encontrada e bem adaptada ao processo fermentativo do café (CARVALHO NETO et al., 2017; PEREIRA et al., 2014), enquanto na Austrália, Elhalis, Cox e Zhao (2020) identificaram pela primeira vez a levedura *Pichia kudriavzevii*. Na Sierra Nevada de Santa Marta, na Colômbia, LAB do gênero *Leuconostoc* e leveduras do gênero *Kazachstania*, incluindo *K. gamospora* e *K. humilis*, foram os microrganismos predominantes durante a fermentação submersa do café (CRUZ-O'BYRNE et al., 2021). Além disso, a diversidade de espécies de microrganismos procarióticos e eucarióticos difere entre diferentes regiões no Brasil, possivelmente devido a variações na temperatura ambiental, umidade, composição da polpa remanescente, mucilagem que envolve os grãos de café e altitude (EVANGELISTA, MIGUEL, SILVA, PINHEIRO e SCHWAN, 2015).

Durante a fermentação do café, a população microbiana pode proliferar significativamente, utilizando principalmente os açúcares presentes na mucilagem como substrato, e produzindo uma ampla variedade de compostos metabólicos (ELHALIS, COX e ZHAO, 2020; ELHALIS et al., 2020b; PEREIRA et al., 2022). Essa produção de metabólitos, especialmente ácidos orgânicos, resulta na acidificação do ambiente e na redução do pH ao longo do tempo de fermentação, o que por sua vez influencia a diversidade microbiana presente no biorreator (ELHALIS, COX e ZHAO, 2020; EVANGELISTA, MIGUEL, SILVA, PINHEIRO e SCHWAN, 2015; POTHAKOS et al., 2020).

A complexa população microbiana durante a fermentação do café é afetada pelo método de fermentação utilizado e pelas condições ambientais (MARTINS et al., 2020; PEREIRA et al., 2022). Os principais grupos monitorados durante o processo fermentativo incluem bactérias mesofílicas, LAB e leveduras. Em um ambiente aberto, C. F. Silva, Batista, Abreu, Dias e Schwan (2008); Vilela, Pereira, Silva, Batista e Schwan (2010) mostraram que as bactérias eram predominantes nos estágios iniciais da fermentação, enquanto a população de leveduras aumentava significativamente posteriormente. Similarmente, no processo SIAF, tanto em fermentações naturais quanto descascadas, as sucessões microbianas são iniciadas por bactérias seguidas por leveduras (PEREIRA et al., 2022). Na fermentação submersa, Pothakos et al. (2020) identificaram três fases microbianas sucessivas, com diferentes grupos dominantes em cada fase.

A presença e a dinâmica das bactérias mesofílicas durante a fermentação do café são fundamentais para o processo, com *Bacillus* desempenhando um papel importante na degradação da polpa e da mucilagem do café (VILELA, PEREIRA, SILVA, BATISTA e SCHWAN, 2010). Estudos realizados em diferentes condições de fermentação mostram variações na população bacteriana ao longo do tempo, com valores iniciais altos diminuindo posteriormente (RIBEIRO et al., 2018; T. S. PEREIRA et al., 2022). Bactérias mesofílicas, como *Staphylococcus warneri*, *Erwinia persicina* e *Enterobacter asburiae*, foram identificadas como predominantes em diferentes momentos da fermentação submersa (EVANGELISTA, MIGUEL, SILVA, PINHEIRO e SCHWAN, 2015).

As bactérias ácido lácticas (BAL), por sua vez, apresentam uma menor diversidade, influenciada pelo tipo de fermentação e pela altitude. Estudos demonstram variações na população de BAL, com *Leuconostoc mesenteroides* e *Lactococcus lactis* aumentando nas primeiras horas de fermentação e diminuindo posteriormente (VILELA, PEREIRA, SILVA, BATISTA e SCHWAN, 2010; ELHALIS, COX e ZHAO, 2020; PEREIRA et al., 2022; MARTINS et al., 2020).

As BAL são favorecidas durante a fermentação do café devido à sua capacidade de utilizar diversos substratos, como açúcares e compostos fenólicos, contribuindo para a produção de ácido láctico, que influencia diretamente na qualidade final do café (EVANGELISTA, MIGUEL, SILVA, PINHEIRO e SCHWAN, 2015; RIBEIRO et al., 2018). As leveduras também desempenham um papel crucial na fermentação, com populações aumentando ao longo do tempo e contribuindo para a complexidade sensorial do café (VILELA, PEREIRA, SILVA, BATISTA e SCHWAN, 2010; EVANGELISTA, MIGUEL, SILVA, PINHEIRO e SCHWAN, 2015; PEREIRA et al., 2014; MARTINS et al., 2020). Embora algumas cepas, como *Saccharomyces sp.* e *P. fermentans*, se destaquem nessa função, outras leveduras, como *H. uvarum*, *Candida* e *Wickerhamomyces*, contribuem para a produção de metabólitos e compostos de sabor, além de exercerem efeitos antioxidantes e inibirem o crescimento de microrganismos indesejados (ELHALIS, COX, FRANK e ZHAO, 2020a; PEREIRA et al., 2014; PEREIRA et al., 2022).

A fermentação espontânea surge como uma técnica promissora para a produção de cafés especiais, oferecendo perfis sensoriais distintos apreciados por paladares exigentes. No entanto, a garantia da consistência desses resultados ao longo do tempo enfrenta desafios devido à variabilidade das condições ambientais e à falta de controle estruturado do processo em muitas fazendas (PEREIRA et al., 2015; PEREIRA et al., 2020). Assim, embora a fermentação

espontânea abra possibilidades para a diversidade sensorial do café, a padronização dos processos permanece como um objetivo desafiador a ser alcançado.

3.2.3.2 Utilização de culturas iniciadoras

Na fermentação do café, as culturas iniciadoras desempenham um papel fundamental, consistindo em microrganismos pré-selecionados introduzidos para dominar a população microbiana durante o processo (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS & PINHEIRO, 2021; CARVALHO NETO et al., 2020; EVANGELISTA et al., 2014b; SOCCOL et al., 2016; SILVA et al., 2013). Essas culturas podem ser compostas por uma única cepa ou uma combinação delas, conhecida como co-inoculação (BRESSANI et al., 2021; CASSIMIRO et al., 2022; VALE et al., 2019). A seleção criteriosa e o uso dessas cepas resultam em maior uniformidade microbiológica e consistência nos metabólitos produzidos (PEREIRA et al., 2015; RIBEIRO, MIGUEL et al., 2017).

A aplicação das culturas iniciadoras pode ser feita de diversas formas, sendo comum a reidratação de culturas liofilizadas em água, seguida pela dispersão sobre os grãos de café (PEREIRA et al., 2015; RIBEIRO, MIGUEL et al., 2017). Isso pode encurtar o tempo de fermentação e melhorar a qualidade do café, além de proporcionar controle e previsibilidade ao processo (EVANGELISTA et al., 2014b; CARVALHO NETO et al., 2016; SOCCOL et al., 2016).

Apesar dos benefícios, o uso de culturas iniciadoras pode aumentar os custos de produção, sendo necessário considerar a relação custo-benefício (MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2021; PEREIRA, SOCCOL, BRAR, NETO & SOCCOL, 2017). No entanto, o controle proporcionado por essas culturas pode garantir uma qualidade padronizada e reduzir as perdas econômicas para os produtores (PEREIRA, SOCCOL, BRAR, NETO & SOCCOL, 2017).

O emprego de culturas iniciadoras é uma alternativa promissora para melhorar a qualidade sensorial do café, aumentando seu valor final (BRESSANI et al., 2018). A seleção dessas culturas é baseada em cepas identificadas no café ou durante a fermentação espontânea, sendo que apenas um pequeno número de espécies é geralmente escolhido para essa finalidade (ELHALIS, COX, FRANK & ZHAO, 2021; JUNQUEIRA et al., 2022; PEREIRA, BEUX et al., 2016; PEREIRA et al., 2014).

Ao explorar a dinâmica microbiana na fermentação do café, destaca-se a importância das cepas selecionadas, que devem ser capazes de prosperar em condições desafiadoras, como

variações de pH, pressão osmótica e altas temperaturas (ELHALIS, COX, FRANK & ZHAO, 2021; PEREIRA et al., 2014). A atividade enzimática, especialmente a produção de enzimas pectinolíticas, é essencial para a degradação do mucilago do café (ELHALIS et al., 2021; LEE et al., 2015; SOCCOL et al., 2016; SILVA et al., 2013). A diversidade bacteriana pode influenciar diretamente o perfil sensorial do café, com algumas cepas, como *Lactobacillus plantarum*, promovendo melhorias significativas (RIBEIRO et al., 2020).

O uso de culturas iniciadoras, principalmente leveduras como *Saccharomyces cerevisiae* e bactérias como *Lactobacillus plantarum*, é uma estratégia eficaz para controlar a fermentação e melhorar a qualidade do café (BRESSANI et al., 2021; EVANGELISTA et al., 2014; PEREIRA et al., 2015; PEREIRA et al., 2020). Estudos mostram que a co-inoculação de diferentes cepas microbianas pode intensificar os efeitos positivos na qualidade sensorial do café, resultando em notas sensoriais mais complexas e uma pontuação geral superior (G et al., 2019; CASSIMIRO et al., 2022; VALE et al., 2019). Essa abordagem promissora oferece uma maneira de otimizar a fermentação do café e influenciar sua composição química de forma favorável.

As culturas iniciadoras oferecem uma perspectiva promissora para melhorar a qualidade e o sabor do café, embora sua eficácia possa variar dependendo de vários fatores, como a altitude, o método de fermentação e a variedade de café (EVANGELISTA et al., 2014a; EVANGELISTA et al., 2014b; SOCCOL et al., 2016). A composição química e sensorial do café fermentado é influenciada por condições físico-químicas durante a fermentação, como pH, temperatura e disponibilidade de oxigênio (MOTA et al., 2020).

A altitude desempenha um papel crucial na qualidade do café, com diferenças significativas na composição química e sensorial entre altitudes mais baixas e elevadas (OLIVEIRA et al., 2021; MARTINS et al., 2020). Em altitudes mais baixas, o uso de culturas iniciadoras pode ser benéfico para melhorar a qualidade do café, enquanto em altitudes mais altas, o processo de fermentação espontânea pode ser suficiente para produzir cafés de alta qualidade (BRESSANI et al., 2021a; PEREIRA et al., 2020).

Estudos comparativos mostraram resultados variados sobre o impacto das culturas iniciadoras na qualidade do café em diferentes altitudes. Enquanto algumas pesquisas destacam benefícios significativos da inoculação em altitudes mais baixas (PEREIRA et al., 2020), outras não encontraram diferenças significativas na pontuação sensorial entre fermentação espontânea e inoculada em algumas altitudes (OLIVEIRA et al., 2021).

Entender a dinâmica do crescimento das culturas iniciadoras é crucial para sua eficácia. Embora a população de leveduras inoculadas geralmente seja maior do que no processo espontâneo, o crescimento de cada cepa pode variar ao longo do tempo e de acordo com o método de fermentação. Além disso, estudos mostram que as culturas iniciadoras podem alterar a comunidade microbiana, afetando a diversidade e a atividade dos microrganismos presentes (OLIVEIRA et al., 2021; MARTINS et al., 2020).

Assim, o uso de culturas iniciadoras no processo de fermentação do café oferece oportunidades para melhorar sua qualidade sensorial, mas sua eficácia é influenciada por uma variedade de fatores, destacando a necessidade de mais pesquisas nessa área.

3.3 Tratamento dos frutos de café no processo fermentativo

O contexto do processamento do café, os métodos de tratamento dos frutos, como o natural e o despulpado, influenciam significativamente a qualidade e o sabor do café resultante (BRESSANI et al., 2020; BRESSANI et al., 2021b; MOTA et al., 2020). Estudos mostram que o mesmo inoculante pode gerar bebidas com características sensoriais distintas, dependendo da variedade e do tratamento do café (BRESSANI et al., 2020; BRESSANI et al., 2021b).

O café natural, com a polpa intacta, possui uma concentração de açúcar mais elevada devido à presença de mucilagem aderida à casca, enquanto o café despulpado apresenta menor concentração inicial de açúcar, pois apenas a mucilagem serve como fonte de fermentação (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS e PINHEIRO, 2021).

Embora ambos os tratamentos possam ser usados em diferentes condições de fermentação, a escolha depende da disponibilidade de recursos e das características sensoriais desejadas (BRESSANI et al., 2020; BRESSANI et al., 2021b). O café natural é mais acessível e requer menos água, enquanto o café despulpado exige mais investimentos em infraestrutura e resulta em maior geração de águas residuais (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS e PINHEIRO, 2021).

No entanto, a influência do tratamento do café ainda é pouco explorada, destacando a necessidade de mais pesquisas para entender melhor seus efeitos na fermentação e nas características finais do café (CARDOSO, AGNOLETTI, FREITAS e PINHEIRO, 2021). Atualmente, a pesquisa em café tem se concentrado em diversas áreas, incluindo o mapeamento de microrganismos, a análise de compostos durante a fermentação e o impacto das condições de fermentação na qualidade sensorial (BRESSANI et al., 2020; MOTA et al., 2020).

O objetivo é desenvolver cafés de alta qualidade que atendam à demanda por bebidas especiais com perfis sensoriais distintos (BREISSANI et al., 2020; MOTA et al., 2020).

Embora haja uma transição para métodos de fermentação em ambientes fechados, não existe um método único que garanta consistentemente a melhoria da qualidade do café em todas as condições (BREISSANI et al., 2020; MOTA et al., 2020). A escolha do método depende da infraestrutura disponível e dos objetivos individuais do produtor (BREISSANI et al., 2020; MOTA et al., 2020).

A fermentação do café é um processo complexo, afetado por uma variedade de fatores que incluem temperatura, aeração e agitação, mas ainda falta um controle preciso desses parâmetros (CARDOSO et al., 2021). Cada método de processamento oferece condições únicas de fermentação, resultando em diferenças nas características da bebida final (CARDOSO et al., 2021). Embora a fermentação espontânea possa produzir cafés de alta qualidade, a falta de controle pode levar a variações devido à microbiota variável, influenciada por fatores sazonais e climáticos (CARDOSO et al., 2021).

Introduzir a fermentação antes da secagem pode ajudar a minimizar essas variações (CARDOSO et al., 2021). O tipo de fermentação utilizado afeta a disponibilidade de oxigênio, a composição da microbiota e os metabólitos produzidos, influenciando as características sensoriais do café (CARDOSO et al., 2021). Outras variáveis, como uso de frutas com ou sem casca, altitude, variedade de café e cepa de cultura iniciadora, também têm impacto no produto (CARDOSO et al., 2021).

As culturas iniciadoras são essenciais para controlar o processo, promovendo a microbiota desejada e influenciando a qualidade do café final. Mesmo quando não aumentam a pontuação final, as culturas iniciadoras podem proporcionar perfis sensoriais diferentes, ampliando as opções para os consumidores (CARDOSO et al., 2021). Algumas cepas são mais adequadas para certas variedades de café e condições de fermentação específicas. A co-inoculação de múltiplas cepas mostrou resultados promissores, proporcionando um controle mais preciso do processo de fermentação. Com base na diferenciação no crescimento microbiológico durante a fermentação espontânea, o uso de culturas iniciadoras mistas pode ser uma estratégia eficaz para garantir microrganismos dominantes em cada estágio do processo (CARDOSO et al., 2021).

4 METODOLOGIA

4.1 Planejamento experimental e classificação

O estudo utilizou o café de primeira colheita da variedade Paraíso, cultivada na Fazenda Reserva Heitor, situada em Patos de Minas, na região do Alto Paranaíba, no estado de Minas Gerais, Brasil. A colheita mecânica ocorreu durante a safra 2022/2023. Após a colheita, os frutos foram processados, passando por lavagem, remoção de impurezas e classificação com base no estágio de maturação. Por meio de uma lavadora, os grãos de café foram separados de acordo com a densidade, distinguindo os grãos mais leves (secos, malformados e imaturos) dos frutos mais pesados (cerejas e grãos esverdeados). As amostras foram então distribuídas em grupos experimentais, como testemunha, os quais foram direto para o processamento de secagem e outros baseados nos tempos de fermentação, variando entre 24, 48 e 72 horas, e submetidas a processos de fermentação autoinduzida em estado sólido (sem adição de água) e submerso (com adição de 30% v/v de água). Biorreatores de polipropileno não tóxico, com capacidade de 20 litros, foram utilizados para a fermentação, devidamente sanitizados com ácido peracético a 5% e selados hermeticamente para permitir a saída de dióxido de carbono gerado durante o processo, enquanto impediam a entrada de ar externo. Foi utilizado um biorreator para cada condição de fermentação (estado sólido e submerso), com controle de temperatura a 27°C, e sem controle de temperatura, para cada intervalo de tempo avaliado (24, 48, 72 horas), totalizando 12 biorreatores, conforme demonstrado na Figura 1, além do testemunha.

	Com controle de temperatura (27°C)			Sem controle de temperatura		
	24 horas	48 horas	72 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Fermentação em estado-sólido (FES)						
Fermentação Submersa (30% água) (FSM)						

Figura 1. Configuração experimental ilustrando o processo de fermentação para café natural submetido a um dos dois métodos de fermentação: fermentação em estado sólido (FES) ou fermentação submersa (FSM). Esses processos foram realizados ao longo de três períodos diferentes: 24, 48 e 72 horas, criando um total de 12 cenários de fermentação distintos.

As amostras foram coletadas em triplicata em diferentes pontos dos biorreatores após a homogeneização dos conteúdos. Após a fermentação, os frutos foram imediatamente lavados para interromper o processo e submetidos à secagem em terreiros de cimento até atingirem 12% de umidade. Posteriormente, os cafés foram armazenados por no mínimo 30 dias antes de prosseguir com as etapas de processamento do café. Os frutos de café naturais que não passaram por SIAF (Fermentação Anaeróbica Autoinduzida) e foram diretamente para o processo de secagem em terreiros de cimento foram chamados de Testemunha durante a apresentação dos resultados.

4.2 Análise Sensorial

Os grãos de café foram selecionados e torrados nas instalações de torrefação da Cooperativa Expocacer em Patrocínio, Minas Gerais, Brasil, seguindo as diretrizes da *Specialty Coffee Association* (SCA). Utilizou-se um torrador Atila Gold Plus—10 Kg (Atila, Belo Horizonte, Brasil), com os grãos sendo torrados no máximo 24 horas antes da degustação, variando a duração da torrefação entre 8 e 12 minutos. Posteriormente, os grãos foram moídos usando um moedor elétrico (Tramontina, Carlos Barbosa, RS, Brasil).

Para avaliar o impacto da duração da fermentação na qualidade final da bebida de café, os grãos torrados foram submetidos à análise sensorial de acordo com o protocolo da SCA. Cada amostra foi preparada em cinco xícaras, mantendo uma relação precisa de $8,25 \pm 0,25$ g de café para 150 mL de água, com a temperatura controlada entre 92,2 °C e 94,4 °C.

A análise sensorial foi realizada por cinco *Q-Graders* certificados, que avaliaram 11 atributos específicos: fragrância/aroma, sabor, retrogosto, acidez, corpo, equilíbrio, uniformidade, xícara limpa, doçura e qualidade geral, além de identificar defeitos. Cada atributo foi classificado em uma escala de 6 a 10, com incrementos de 0,25. Atributos negativos foram considerados defeitos e impactaram negativamente a pontuação de qualidade geral do café.

Além das avaliações quantitativas, os provadores também atribuíram atributos sensoriais descritivos a cada amostra, utilizando o modelo fornecido pelo círculo de sabores.

4.3 Análise de dados

A análise de dados foi conduzida em um experimento que empregou um delineamento completamente casualizado (DCC) em arranjo fatorial, em que os fatores e seus níveis eram:

temperatura com e sem controle, fermentação em ambiente submerso ou seco, e tempo de fermentação (24, 48 e 72 horas). Desta forma, o experimento envolveu 12 tratamentos, sendo que todas as medições e amostras foram feitas com três repetições cada, permitindo a análise independente dos efeitos dos tratamentos e da duração da fermentação. Para avaliar a normalidade dos resíduos dos dados e a homogeneidade das variâncias, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk. A análise comparativa dos valores médios em todos os testes foi conduzida por meio de ANOVA, seguida pelo teste de Tukey no software MiniTab versão 17.1.0 (Minitab, Inc., State College, PA, EUA), considerando valores de p inferiores a 0,05 como estatisticamente significativos. Foram realizadas comparações para avaliar se houve diferença para o mesmo tratamento ao longo do tempo de fermentação (24, 48 e 72 horas em comparação com o tempo zero), bem como se houve diferença entre os diferentes tratamentos com o mesmo tempo de processo de fermentação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cafés submetidos aos diversos tipos de processos fermentativos foram avaliados por *Q-Graders*, seguindo os protocolos estabelecidos pela *Specialty Coffee Association* (SCA). Em comparação com o café testemunha, tanto em condições secas quanto submersas, os escores obtidos variaram de 80,95 a 82,85. Todos os tratamentos, incluindo o café testemunha, foram classificados como cafés especiais, com uma pontuação acima de 80 (Figura 2).

Entre os seis tratamentos com café submerso, destacou-se aquele com duração de 72 horas, sem controle de temperatura, que obteve o maior escore ($82,85 \pm 0,03$) comparado aos demais tratamentos. Seguido por outros dois tratamentos com as maiores pontuações médias, observados nos tratamentos em estado seco com duração de 72 horas, com e sem controle de temperatura, ambos com escore de ($82,80 \pm 0,03$).

Observa-se que os quatro processos fermentativos que obtiveram as maiores pontuações (82,85, 82,80, e 82,80 e 82,65) não se diferem significativamente entre si, ao nível de 5% de significância. Mesmo que os escores obtidos sejam diferentes, estatisticamente representam a mesma pontuação, ou seja, possuem a mesma qualidade.

De modo geral, observa-se que o café de primeira colheita, quando não submetido à fermentação (testemunha), obteve uma nota significativamente menor que aqueles que passaram por fermentação, especialmente por fermentações com períodos mais longos (72 horas). Esses resultados sugerem que a fermentação pode ser uma etapa crucial a ser

implementada nas operações de pós-colheita capaz de aprimorar a qualidade do café, corroborando estudos anteriores que destacam a variedade Paraíso como propícia à produção de bebidas de alta qualidade.

Além disso, a fermentação em estado sólido demonstrou ser uma técnica eficaz principalmente quando empregada no processamento do café natural, pois elimina a necessidade da etapa de despulpamento, resultando em uma economia de água de até 89%.

Fonte: autoria própria.

	Avaliador 1	Avaliador 2	Avaliador 3	Avaliador 4	Avaliador 5	Média	
Submerso sem T 72h	83.5	82.75	83	83	82	82.85	a
Seco com T 72h	83.25	82.5	82.75	82.5	83	82.80	a
Seco sem T 72h	83	83	82	83	83	82.80	a
Seco sem T 48h	82.75	83	83.5	82.25	81.75	82.65	a
Seco sem T 24h	82.5	82.5	82.5	82	82.5	82.40	ab
Submerso sem T 24h	83	81.75	82.75	82.5	81.75	82.35	ab
Seco com T 24h	82.25	83	82.75	81.75	80	81.95	ab
Submerso com T 48h	82.5	81.25	82	82.5	81.25	81.90	ab
Submerso sem T 48h	82	81.5	82.75	82.25	80.75	81.85	ab
Submerso com T 72h	82.5	81.75	81.75	82	81.25	81.85	ab
Seco com T 48h	82	82.5	81.75	82	80.75	81.80	ab
Submerso com T 24h	81.75	82.75	81	81.75	81	81.65	ab
Testemunha	80.75	81.75	81	82	79.25	80.95	b

Figura 2. Classificação dos cafés obtidos ao longo do processo fermentativo de 72 horas. Os tratamentos avaliados foram frutos de café in natura, submetidos ao SIAF nos processos de estado sólido e submerso, com e sem controles de temperatura. Médias acompanhadas em letras diferentes são estatisticamente diferentes, por meio de teste ANOVA fatorial, ao nível de 5% de significância.

Por meio da análise ANOVA fatorial, observou-se o impacto de cada fator utilizado como fonte de variação nas fermentações, sendo eles: controle de temperatura (com e sem), ambiente de fermentação (submerso e seco) e tempo de fermentação (24, 48 e 72 h). Inicialmente, analisou-se a presença de interações entre cada um dos fatores ao nível de 5% de significância, não sendo identificadas interações significativas entre nenhum dos fatores estudados ($p = 0,7274$ para ambiente e controle de temperatura; $p = 0,7928$ para ambiente e tempo; e $p = 0,9115$ para controle de temperatura e tempo).

Desta forma, prosseguiu-se para a análise de cada fator isoladamente, cujos resultados podem ser observados nas figuras abaixo para fermentação em ambiente seco vs submerso

(Figura 3); fermentação com controle de temperatura vs sem controle de temperatura (Figura 4); e fermentação com diferentes durações 24 vs 48 vs 72 horas (Figura 5);

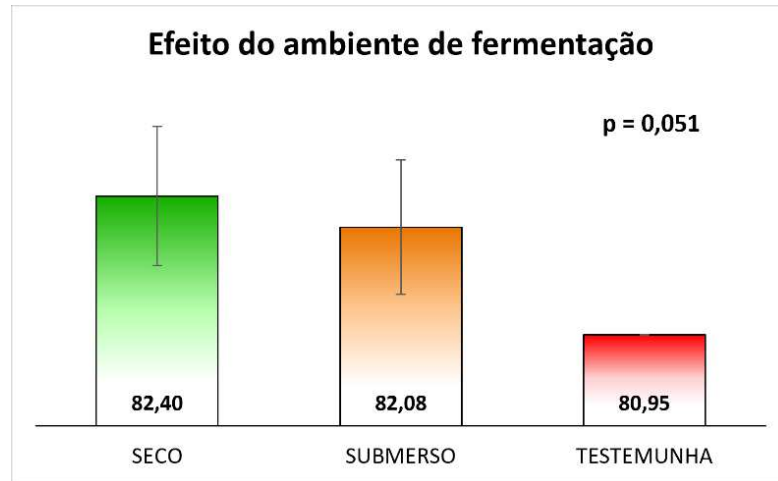


Figura 3. Efeito do ambiente de fermentação de café em café de primeira colheita. Analisados por meio de teste ANOVA fatorial, ao nível de 5% de significância.

Na análise do efeito do ambiente de fermentação, seco e submerso, observa-se que o valor de $p = 0,051$, o que indica que o ambiente de fermentação não promove diferenças significativas, ao nível de 5%, na qualidade observada na bebida. No entanto, o valor de $p = 0,051$ indica uma tendência de diferença real entre as médias dos escores obtidos, indicando que, de fato, a fermentação do café em ambientes secos, resulta em um café especial com maior escore médio (82,40), quando comparado ao ambiente submerso e ao café testemunha.

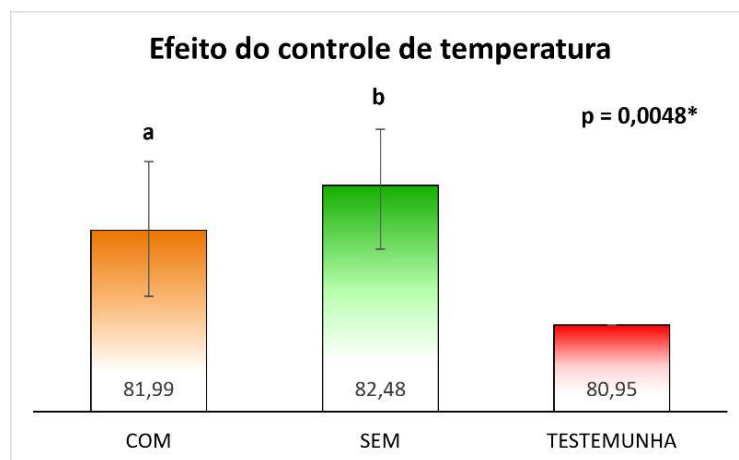


Figura 4. Efeito do controle de temperatura na fermentação de café de primeira colheita. Médias acompanhadas em letras diferentes são estatisticamente diferentes, por meio de teste ANOVA fatorial, ao nível de 5% de significância.

Ao analisar o efeito do controle da temperatura de fermentação, observa-se que $p = 0,0048$, sendo estatisticamente significativo ao nível de 5%. Isso demonstra que existe diferença significativa entre as médias obtidas, indicando, assim, que a fermentação do café em um ambiente sem controle de temperatura, resulta em um café especial com maior escore (82,48), quando comparado ao café com controle de temperatura e a testemunha. São necessários, de fato, experimentos complementares que atestem isso, porém, caso essa diferença seja confirmada, o controle de temperatura poderia ser retirado da operação fermentativa, reduzindo possíveis custos envolvidos com o processo.

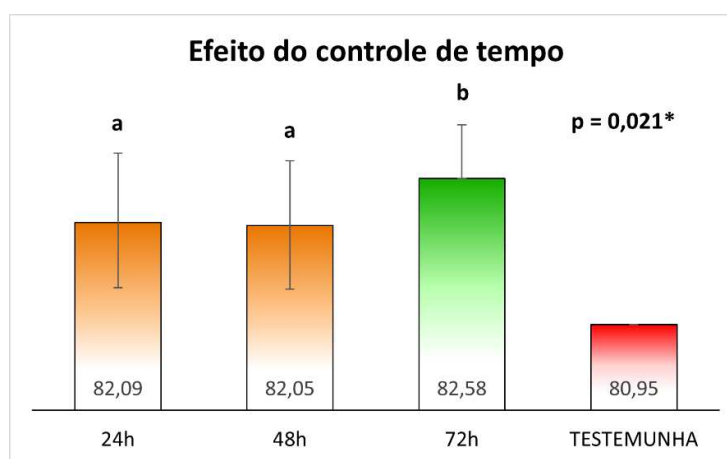


Figura 5. Efeito do tempo de fermentação em café de primeira colheita. Médias acompanhadas em letras diferentes são estatisticamente diferentes, por meio de teste ANOVA fatorial, ao nível de 5% de significância.

Na análise do efeito do controle do tempo de fermentação, observa-se que $p = 0,021$, sendo estatisticamente significativo ao nível de 5%. Isso indica que existe uma diferença significativa entre as médias obtidas, sugerindo, assim, a tendência de que cafés fermentados por períodos mais longos resultariam em um café especial com escores médios mais altos, em comparação com os tempos de 24, 48, que não demonstraram diferenças significativas entre si. Por outro lado, apesar apresentar notas inferiores à fermentação de 72 horas, cafés que passaram por tempos de fermentação mais curtos, como 24 e 48 horas, apresentaram médias significativamente superiores àqueles que não passaram por processos fermentativos (testemunha). Segundo De Bruyn et al., 2017, o tempo prolongado de fermentação resulta no aumento das concentrações de ácido acético, etanol, glicerol, ácido glicurônico, ácido lático, manitol e ácido succínico.

6 CONCLUSÃO

A avaliação dos cafés de primeira colheita da variedade Paraíso, submetidos a diferentes processos fermentativos, revelou resultados consistentes com estudos anteriores, destacando a importância da fermentação na produção de cafés especiais de alta qualidade. Todos os tratamentos avaliados, incluindo a testemunha, foram classificados como cafés especiais, com pontuações superiores a 80, indicando a eficácia dos processos fermentativos em melhorar a qualidade sensorial do café.

As análises estatísticas mostraram que não houve interações significativas entre os fatores ambientais, controle de temperatura e tempo de fermentação. No entanto, ao analisar cada fator isoladamente, observou-se que o ambiente de fermentação seco para café de primeira colheita resultou em bebidas especiais com pontuações mais altas em comparação com o ambiente submerso. Da mesma forma, a ausência de controle de temperatura durante a fermentação de cafés de primeira colheita resultou em bebidas com escores superiores em relação ao café com controle de temperatura.

A análise do tempo de fermentação revelou que fermentações mais longas para cafés de primeira colheita, especialmente aquelas com duração de 72 horas, resultaram em bebidas com pontuações mais altas. Esses resultados estão em concordância com estudos anteriores, que indicam que tempos prolongados de fermentação contribuem para o aumento das concentrações de compostos orgânicos que influenciam positivamente na qualidade sensorial do café.

Portanto, entende-se que os resultados obtidos neste estudo contribuem significativamente para o entendimento da influência dos processos fermentativos na produção de cafés especiais, especialmente cafés de lavouras de primeira colheita, proporcionando *insights* valiosos para aprimorar o controle do processo e promover maior reprodutibilidade dos resultados. Em última análise, essas descobertas reforçam a posição da variedade Paraíso como uma excelente opção para a obtenção de cafés superiores, enriquecendo ainda mais o cenário da produção de cafés especiais.

REFERÊNCIAS

Bastian, F., Hutabarat, O. S., Dirpan, A., Nainu, F., Harapan, H., Emran, T. Bin, & Simal Gandara, J. (2021). Da plantação à xícara: Mudanças nos compostos bioativos durante o processamento do café. *Alimentos* 2021, Vol. 10, Página 2827, 10(11), 2827 doi: 10.3390/foods10112827.

Batista, L. R., Souza, S. M. C., Batista, C. F. S.e., & Schwan, R. F. (2016). Café: Tipos e produção. *Enciclopédia de Alimentos e Saúde*, 244–251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00184-7>

Bodner, M., Morozova, K., Kruathongsri, P., Thakeow, P., & Scampicchio, M. (2019). Efeito da altitude de colheita, tempo de fermentação e grau de torrefação no aroma liberado pelo pó de café monitorado por espectrometria de massa de transferência de prótons. *Pesquisa Europeia em Tecnologia e Ciência de Alimentos*, 245, 1499–1506. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03281-5>

Bressani, A. P. P., Batista, N. N., Ferreira, G., Martinez, S. J., Simão, J. B. P., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2021). Caracterização de compostos bioativos, químicos e sensoriais de cafés fermentados com diferentes espécies de leveduras. *Pesquisa Internacional em Alimentos*, 150, Artigo 110755. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110755>

Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Batista, N. N., Simão, J. B. P., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2021). Coinoculação de leveduras iniciadoras: Uma estratégia para melhorar a qualidade do café Arábica de baixa altitude. *Química Alimentar*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130133>

Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Evangelista, S. R., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2018). Características do café fermentado inoculado com culturas iniciadoras de leveduras usando diferentes métodos de inoculação. *LWT - Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 92, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.029>

Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Sarmiento, A. B. I., Borém, F. M., & Schwan, R. F. (2020). Ácidos orgânicos produzidos durante a fermentação e percepção sensorial em café especial utilizando cultura iniciadora de leveduras. *Pesquisa Internacional em Alimentos*, 128, Artigo 108773. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108773>

Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Sarmiento, A. B. I., Borém, F. M., & Schwan, R. F. (2021). Influência da inoculação de leveduras na qualidade do café fermentado (*Coffea arabica* var. Mundo Novo) processado pelos métodos natural e natural descascado. *Jornal Internacional de Microbiologia Alimentar*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109107>

Brioschi Junior, D., Guarçoni, R. C., Silva, M., de, C. S., Veloso, T. G. R., Kasuya, M. C. M., Pereira, L. L. (2021). A fermentação microbiana afeta o perfil sensorial, químico e microbiano do café sob maceração carbônica. *Química Alimentar*, 342 (outubro 2020), Artigo 128296. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128296>

Cardoso, W. S., Agnoletti, B. Z., Freitas, R., & Pinheiro, F. A. (2021). Aspectos bioquímicos da fermentação do café. In L. L. Pereira & T. R. Moreira (Eds.), *Determinantes de Qualidade na Produção de Café* (1a ed., pp. 149–208). Cham: Springer.

Carvalho Neto, D. P., Melo Pereira, G. V., Tanobe, V. O. A., Soccol, V. T., Silva, B. J. G., Rodrigues, C., & Soccol, C. R. (2017). Diversidade de leveduras e características físico-químicas associadas à fermentação de grãos de café da região do Cerrado Mineiro brasileiro. *Fermentação*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION3010011>

Carvalho Neto, D. P., Melo, V., Pereira, G., Finco, A. M. O., Rodrigues, C., Carvalho, J. C., & Soccol, C. R. (2020). Estudos microbiológicos, físico-químicos e sensoriais da fermentação de grãos de café conduzidos em um modelo de biorreator de leveduras. *Biotecnologia de Alimentos*, 34(2), 172–192. <https://doi.org/10.1080/08905436.2020.1746666>

Carvalho Neto, D. P., Pereira, G. V. M., Finco, A. M. O., Letti, L. A. J., Silva, B. J. G., Vandenberghe, L. P. S., & Soccol, C. R. (2018). Remoção eficiente da camada de mucilagem de grãos de café usando fermentação ácida láctica em um biorreator agitado: Estudos cinéticos,

metabólicos e sensoriais. *Biosciência de Alimentos*, 26, 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.10.005>

Cassimiro, D. M. J., Batista, N. N., Fonseca, H. C., Naves, J. A. O., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022). Coinoculação de bactérias lácticas e leveduras aumenta a qualidade do café Arábica fermentado úmido. *Microbiologia de Alimentos*, 369, Artigo 109627.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109627>

Crocomo, O. J., & Gutierrez, L. E. (2013). Metabolismo do Café. In W. Borzani, W. Schmidell, U. de A. Lima, & E. Aquarone (Eds.), *Biotechnologia Industrial* (1a ed., pp. 177–196). Editora Edgard Blucher LTDA.

Cruz-O’Byrne, R., Piraneque-Gambasica, N., & Aguirre-Forero, S. (2021). Diversidade microbiana associada ao processo de fermentação espontânea de grãos de café e produção de café especial no norte da Colômbia. *Microbiologia de Alimentos*, 354, Artigo 109282.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109282>

CULTIVAR MGS Paraíso 2 é destaque em diferentes sistemas de produção. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81869948/cultivar-mgs-paraiso-2-e-destaque-em-diferentes-sistemas-de-producao>. Acesso em: 17 abr. 2024.

DE BRUYN, F.; ZHANG, S. J.; POTHAKOS, V.; TORRES, J.; LAMBOT, C.; MORONI, A. V.; CALLANAN, M.; SYBESMA, W.; WECKX, S.; DE VUYST, L. Explorando os impactos do processamento pós-colheita sobre a microbiota e os perfis de metabólitos durante a produção de grãos verdes de café. *Microbiologia de Alimentos*, v. 83, e02398-16, 2017.

Donfrancesco, B., Guzman, N. G., & Chambers, E., IV (2019). Similaridades e diferenças nas propriedades sensoriais do café Arábica de alta qualidade em uma pequena região da Colômbia. *Pesquisa Internacional em Alimentos*, 116 (agosto), 645–651.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.090>

Elhalis, H., Cox, J., & Zhao, J. (2020). Diversidade ecológica, evolução e metabolismo de comunidades microbianas na fermentação úmida de grãos de café australiano. *Microbiologia*

Internacional de Alimentos, 321 (janeiro), Artigo 108544.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108544>

Elhalis, H., Cox, J., Frank, D., & Zhao, J. (2020a). O papel crucial das leveduras na fermentação úmida de grãos de café e na qualidade. *Microbiologia Internacional de Alimentos*, 333(maio), Artigo 108796. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108796>

Elhalis, H., Cox, J., Frank, D., & Zhao, J. (2020b). O papel da fermentação úmida na melhoria do sabor, aroma e qualidade sensorial do café. *Pesquisa e Tecnologia Alimentar Europeia*, 247, 485–498. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03641-6>

Elhalis, H., Cox, J., Frank, D., & Zhao, J. (2021). Desempenho microbiológico e bioquímico de seis espécies de leveduras como potenciais culturas iniciadoras para a fermentação úmida de grãos de café. *Lwt*, 137(agosto), Artigo 110430. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110430>

European market potential for specialty coffee. (2020). Ministry of Foreign Affairs of CBI. <https://www.cbi.eu/market-information/coffee/specialty-coffee/market-potential>.

Evangelista, S. R., Miguel, M. G. C. P., Cordeiro, C. S., Silva, C. F., Pinheiro, A. C. M., & Schwan, R. F. (2014). Inoculação de culturas iniciadoras em um processo de fermentação semi-úmida de café (*Coffea arabica*). *Microbiologia de Alimentos*, 44, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.05.013>

Evangelista, S. R., Miguel, M. G. C. P., Silva, C. F., Pinheiro, A. C. M., & Schwan, R. F. (2015). Diversidade microbiológica associada ao método úmido espontâneo de fermentação de café. *Microbiologia Internacional de Alimentos*, 210, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.008>

Evangelista, S. R., Silva, C. F., Miguel, M. G. P. C., Cordeiro, C. S., Pinheiro, A. C. M., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Melhoria da qualidade da bebida de café utilizando cepas selecionadas de leveduras durante a fermentação no processo seco. *Pesquisa Alimentar Internacional*, 61, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.11.033>

G., S. et al. Café microbioma inicial e abordagem in silico para melhorar o café Arábica. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* [Tecnologia e Ciência de Alimentos], v. 114, n. 108382, p. 108382, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108382>

Gambacorta, F. V., Dietrich, J. J., Yan, Q., & Pfleger, B. F. (2020). Reconfiguração do metabolismo de leveduras para sintetizar produtos além do etanol. *Opinião Atual em Biologia Química*, 59, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.08.005>

Hall, R. D., Trevisan, F., & de Vos, R. C. H. (2022). Química dos frutos e grãos de café - Oportunidades para melhorar a qualidade da xícara e a circularidade da colheita. *Pesquisa Alimentar Internacional*, 151, Artigo 110825. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110825>

Hamdouche, Y., Meile, J. C., Nganou, D. N., Durand, N., Teyssier, C., & Montet, D. (2016). Discriminação de métodos de processamento pós-colheita de café por análises de ecologia microbiana. *Controle Alimentar*, 65, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.022>

Hameed, A., Hussain, S. A., Ijaz, M. U., Ullah, S., Pasha, I., & Suleria, H. A. R. (2018). Da fazenda ao consumidor: Fatores que afetam as características organolépticas do café. II: Fatores de Processamento Pós-Colheita. *Revisões Abrangentes em Ciência Alimentar e Segurança Alimentar*, 17(5), 1184–1237. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12365>

Jitjajoen, W. (2021). Processo Coffivino: Uma nova era na fermentação de café. *Revista de Ciência e Tecnologia Agrícola*, 2(2), 1–5. <https://doi.org/10.14456/jsat.2021.6>

Junqueira, A. C. O., Pereira, G. V. M., Viesser, J. A., Carvalho Neto, D. P., Querne, L. B. P., & Soccol, C. R. (2022). Isolamento e seleção de bactérias ácido lácticas consumidoras de frutose associadas à fermentação de grãos de café. *Biotecnologia Alimentar*, 36(1), 58–75. <https://doi.org/10.1080/08905436.2021.2007119>

Lee, L. W., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2015). Fermentação e sabor do café - Uma relação intrincada e delicada. *Química Alimentar*, 185, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.124>

Martinez, S. J., Rabelo, M. H. S., Bressani, A. P. P., Mota, M. C. B., Borém, F. M., & Schwan, R. F. (2021). Novos tanques de aço inoxidável melhoram a qualidade da fermentação de café. *Pesquisa Alimentar Internacional*, 139 (abril 2020), 109921 doi: 10.1016/j.foodres.2020.109921

Martins, P. M. M., Batista, N. N., Miguel, M. G. C. P., Simão, J. B. P., Soares, J. R., & Schwan, R. F. (2020). A altitude de cultivo do café influencia a microbiota, compostos químicos e a qualidade de cafés fermentados. *Pesquisa Alimentar Internacional*, 129 (dezembro 2019), 108872 doi: 10.1016/j.foodres.2019.108872

Mauricio, J. C., Moreno, J., Zea, L., Ortega, J. M., & Medina, M. (1997). Os efeitos das condições de fermentação do mosto de uva sobre álcoois voláteis e ésteres formados por *Saccharomyces cerevisiae*. *Jornal da Ciência dos Alimentos e Agricultura*, 75(2), 155–160. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199710\)75:2%3C155::AIDJSFA853%3E3.0.CO;2S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199710)75:2%3C155::AIDJSFA853%3E3.0.CO;2S)

Mota, M. C. B., Batista, N. N., Rabelo, M. H. S., Ribeiro, D. E., Borém, F. M., & Schwan, R. F. (2020). Influência das condições de fermentação na qualidade sensorial do café inoculado com levedura. *Pesquisa Alimentar Internacional*, 136(março), Artigo 109482. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109482>

Oliveira, E.C.S., Luz, J.M.R., Castro, M.G., Figueiras, P.R., Guaçoni, R.C., Castro, E.V.R., Silva, M.C.S. Pereira, L.L. (2021). Discriminação química e sensorial do café: Impactos da altitude de plantio e da fermentação. *European Food Research and Technology*, 248(3), 659–669. doi:10.1007/s00217-021-03912-w.

Organização Internacional do Café. (2022). Produção Anual por País. <https://www.ico.org/prices/po-production.pdf>.

Penuela-Martínez, A. E., Zapata-Zapata, A. D., & Durango-Restrepo, D. L. (2018). Desempenho de diferentes métodos de fermentação e o efeito na qualidade do café (*Coffea arabica* L.). *Coffee. Science*, 13(4), 465–476. <https://doi.org/10.25186/cs.v13i4.1486>

Pereira, G. V. M., Carvalho Neto, D. P., Magalhães Júnior, A. I., Vasquez, Z. S., Medeiros, A. B. P., Vandenberghe, L. P. S., & Soccol, C. R. (2019). Explorando os impactos do processamento pós-colheita na formação do aroma dos grãos de café - Uma revisão. *Food Chemistry*, 272(agosto 2018), 441–452 doi: 10.1016/j.foodchem.2018.08.061.

Pereira, G. V. M., Neto, E., Soccol, V. T., Medeiros, A. B. P., Woiciechowski, A. L., & Soccol, C. R. (2015). Realização de fermentações controladas por cultura iniciadora de grãos de café durante o processamento úmido na fazenda: Crescimento, análises metabólicas e efeitos sensoriais. *Food Research International*, 75, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.06.027>

Pereira, G. V. M., Soccol, V. T., Brar, S. K., Neto, E., & Soccol, C. R. (2017). Ecologia microbiana e tecnologia de cultura iniciadora no processamento de café. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(13), 2775–2788. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067759>

Pereira, G. V. M., Soccol, V. T., Pandey, A., Medeiros, A. B. P., Lara, J. M. R. A., Gollo, A. L., & Soccol, C. R. (2014). Isolamento, seleção e avaliação de leveduras para uso na fermentação de grãos de café pelo processo úmido. *International Journal of Food Microbiology*, 188, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.07.008>

Pereira, G. V.de. M., Vale, A.da. S., Carvalho Neto, D. P.de., Muynarsk, E. S., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2020). Bactérias ácido lácticas: O que a indústria de café deve saber? *Current Opinion in Food Science*, 31, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.07.004>

Pereira, L. L., Guarçoni, R. C., Pinheiro, P. F., Osorio, V. M., Pinheiro, C. A., Moreira, T. R., & ten Caten, C. S. (2020). Novas proposições sobre o processamento úmido do café: Perspectivas químicas e sensoriais. *Food Chemistry*, 310(dezembro), Artigo 125943. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125943>

Pereira, L. L., Júnior, D. B., Sousa, L. H. B. P., Santos Gomes, W., Cardoso, W. S., Guarçoni, R. C., & ten Caten, C. S. (2021). Relação entre o processamento do café e a fermentação. In L.

L. Pereira, & T. R. Moreira (Eds.), *Determinantes de Qualidade na Produção de Café* ((1ª ed., pp. 255–301). Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9>.

Pereira, T. S., Batista, N. N., Santos Pimenta, L. P., Martinez, S. J., Ribeiro, L. S., Oliveira Naves, J. A., & Schwan, R. F. (2022). Fermentação de café em anaerobiose autoinduzida: Impacto sobre as comunidades microbianas, composição química e qualidade sensorial do café. *Food Microbiology*, 103, Artigo 103962. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103962>

Pothakos, V., DeVuyst, L., Zhang, S.J., De Bruyn, F., Verce, M., Torres, J., Callanan, M.; Moccand, C. Weckx, S. (2020). Metagenômica shotgun temporal de um processo de fermentação de café equatoriano destaca a predominância de bactérias ácido lácticas. *Pesquisa Atual em Biotecnologia*, 2, 1–15. doi:10.1016/j.crbiot.2020.02.001.

Ribeiro, L. S., Evangelista, S. R., Cruz Pedrozo Miguel, M. G., van Mullem, J., Silva, C. F., & Schwan, R. F. (2018). Características microbiológicas e químico-sensoriais de três variedades de café processadas por fermentação úmida. *Anais de Microbiologia* 2018 68: 10, 68(10), 705–716 doi:10.1007/s13213-018-1377-4.

Ribeiro, L. S., Miguel, M. G. C. P., Evangelista, S. R., Martins, P. M. M., van Mullem, J., Belizario, M. H., & Schwan, R. F. (2017). Comportamento de leveduras inoculadas durante a fermentação semi-seca do café e o efeito nas propriedades químicas e sensoriais da bebida final. *Food Research International*, 92, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.12.011>

Ribeiro, L. S., Miguel, M. G.C. P., Martinez, S. J., Bressani, A. P. P., Evangelista, S. R., Batista, C. F. S. e, & Schwan, R. F. (2020). O uso de cepas de bactérias mesofílicas e ácido lácticas como culturas iniciadoras para a melhoria da fermentação úmida de grãos de café. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2020 36:12, 36(12), 1–15 doi: 10.1007/s11274-020-02963-7.

Ribeiro, L. S., Ribeiro, D. E., Evangelista, S. R., Miguel, M. G. C. P., Pinheiro, A. C. M., Borém, F. M., & Schwan, R. F. (2017). Fermentação controlada do café semi-seco (*Coffea arabica*) usando culturas iniciadoras: Uma perspectiva sensorial. *LWT - Food Science and Technology*, 82, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.008>

SCA. (2018). Tabela de Conteúdo dos Padrões de Café., 14.

Silva, C. F., Batista, L. R., Abreu, L. M., Dias, E. S., & Schwan, R. F. (2008). Sucessão de comunidades bacterianas e fúngicas durante a fermentação natural do café (*Coffea arabica*). *Food Microbiology*, 25(8), 951–957. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.07.003>

Silva, C. F., Vilela, D. M., Cordeiro, C. S., Duarte, W. F., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2013). Avaliação de uma potencial cultura iniciadora para melhorar a qualidade da fermentação do café. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29(2), 235–247. <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1175-2>

Soccol, C. R., Pereira, G. V. de M., Medeiros, A. B. P., & Carvalho Neto, D. P. de. (2022). Processo para produção de cafés especiais através da utilização de culturas lácticas durante o processamento pós-colheita (Patente No. BR 10 2016 011756 9 B1). 03/05/2022.

Soccol, C. R., Pereira, G. V. de M., Soccol, V. T., & Carvalo Neto, D. P. de. (2018). Processo e equipamento para fermentação controlada de grãos de café e obtenção de bebidas especiais (Patente No. BR 10 2016 029488 6 A2). 07/08/2018.

Soccol, C. R., Pereira, G. V. M., & Soccol, V. T. (2016). Cultura iniciadora de leveduras para o processamento de café (Patente No. BR 10 2013 029540 0 A2). 01/11/2016.

Vale, A. S., Pereira, G. V. M., Carvalho Neto, D. P., Rodrigues, C., Pagnoncelli, M. G. B., & Soccol, C. R. (2019). Efeito da co-inoculação com *Pichia fermentans* e *Pediococcus acidilactici* na metabolite produzida durante a fermentação e na composição volátil dos grãos de café. *Fermentation*, 5(3), 3–17. <https://doi.org/10.3390/fermentation5030067>

Vilela, D. M., Pereira, G. V. M., Silva, C. F., Batista, L. R., & Schwan, R. F. (2010). Ecologia molecular e caracterização polifásica da microbiota associada ao café processado semi-seco (*Coffea arabica* L.). *Food Microbiology*, 27(8), 1128–1135. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.07.024>

Wu, H., Gu, J., BK, A., Nawaz, M. A., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2022). Efeito do processamento na bioacessibilidade e biodisponibilidade de compostos bioativos em grãos de café. *Food Bioscience*, 46, Artigo 101373. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101373>

Zhang, S. J., De Bruyn, F., Pothakos, V., Contreras, G. F., Cai, Z., Moccand, C., De Vuyst, L. (2019). Influência de vários parâmetros de processamento na dinâmica da comunidade microbiana, perfis metabólicos e qualidade da xícara durante o processamento úmido do café. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2621. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2019.02621/BIBTEX>