

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

Mirian Elisa Marinho da Silva

Borra de café: pesquisas atuais e perspectivas futuras

Araraquara

2023

Mirian Elisa Marinho da Silva

Borra de café: pesquisas atuais e perspectivas futuras

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho” como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química

Orientador(a): Kelly Johana Dussán Medina

Araraquara

2023

S586b Silva, Mirian Elisa Marinho da
Borra de café : pesquisas atuais e perspectivas futuras /
Mirian Elisa Marinho da Silva. -- Araraquara, 2023
59 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Química) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de
Química, Araraquara
Orientadora: Kelly Johana Dussán Medina

1. Café - Resíduos. 2. Biocombustíveis. 3. Química de
biomassa. 4. Economia circular. 5. Sustentabilidade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Mirian Elisa Marinho da Silva

Borra de café: pesquisas atuais e perspectivas futuras

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Araraquara, 13 de dezembro de 2023

Banca examinadora

Profa. Dra. Kelly Johana Dussán Medina
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Profa. Dra. Lorena Oliveira Pires
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Profa. Dra. Maria Angelica Martins Costa
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos e namorado que sempre me apoiaram emocionalmente e me ajudaram a ter forças para ultrapassar qualquer obstáculo durante a realização deste trabalho.

Aos meus amigos que mesmo a distância sempre estiveram ao meu lado me apoiando.

A professora Kelly por ter sido minha orientadora, desempenhando essa função com dedicação e amizade e por ter tido paciência e compreensão nos momentos de dificuldades com as entregas deste trabalho.

A todos os professores com quem convivi ao longo desses anos de curso, que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

RESUMO

O café é uma das bebidas mais consumidas globalmente e seu consumo gera grandes quantidades de resíduos, com destaque para borra de café que tem como destino final os aterros sanitários. No entanto, estudos recentes destacam seu enorme potencial de reaproveitamento. Visando a importância da valorização deste resíduo, este trabalho teve como objetivo mapear pesquisas recentes sobre alternativas ecológicas e comerciais para o uso da borra de café. As pesquisas abordadas mostraram a viabilidade de conversão da borra de café em bio-óleo, biodiesel, biogás, pellets, compostagem, produção de fungos e de bioativos que podem ser usados na indústria de alimentos e cosméticos, além de já ter algumas empresas que buscam formas de processar e reaproveitar esse resíduo. Apesar dos desafios que ainda precisam ser solucionados, como a viabilidade comercial da produção em larga escala e a logística de coleta desse resíduo, a busca por soluções mais sustentáveis mostram que propor alternativas de usos da borra de café é importante por seu papel na economia circular contribuindo para redução do desperdício e para um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: bioconversão; óleo de café; biocombustível; resíduos; economia circular

ABSTRACT

Coffee is one of the most consumed globally consumed drinks and its consumption generates large amounts of waste, highlighting spent coffee grounds, which has a final destination for landfills. However, recent studies highlight their enormous potential for reuse. Aiming at the importance of valuing this waste, this work aimed to map recent research on ecological and commercial alternatives to use spent coffee grounds. The research addressed showed the feasibility of conversion of spent coffee grounds into bio-oil, biodiesel, biogas, pellets, composting, fungal and bioactive production that can be used in the food and cosmetics industry, as well as having some companies that are looking for ways to process and reuse this residue. Despite the challenges that still need to be solved, such as the commercial viability of large -scale production and the collection logistics of this waste, the search for more sustainable solutions shows that proposing alternatives of spent coffee grounds uses is important for its role in the circular economy contributing to reduced waste and a more sustainable future.

Keywords: bioconversion; coffee oil; biofuel; waste; circular economy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Morfologia do fruto de café.....	14
Figura 2 –	Demanda mundial de café e projeção para 2030.....	16
Figura 3 –	Consumo nacional de café nos últimos vinte e dois anos.....	16
Figura 4 –	Fluxograma das etapas do processamento do grão de café.....	18
Figura 5 –	Exemplo de borra de café.....	21
Figura 6 –	Esfoliante facial da UpCircle feito de borra de café.....	23
Figura 7 –	Exemplo de um colar e de um relógio da empresa Recoffee produzidas a partir da borra de café.....	23
Figura 8 –	Esquema de produção de bio-óleo.....	26
Figura 9 –	Planta piloto de um extrator de solvente contracorrente usada para extração do óleo da borra de café.....	28
Figura 10 –	Fluxograma da extração do óleo da borra de café usando CO ₂ como fluido supercrítico.....	29
Figura 11 –	Esquema de uma planta de extração por fluido supercrítico usado para extrair o óleo da borra de café.....	30
Figura 12 –	Fluxograma de produção do biogás e biometano	32
Figura 13 –	Etapas da digestão anaeróbica em um biodigestor.....	33
Figura 14 –	Etapas da digestão anaeróbica em um biodigestor.....	35
Figura 15 –	Fases de compostagem e sua relação com a temperatura.....	36
Figura 16 –	Pellets de borra de café.....	38
Figura 17 –	Evolução do crescimento e frutificação de fungos em substrato contendo borra de café.....	40
Figura 18 –	Exemplo de um sistema de extração assistida por ultrassom.....	43
Figura 19 –	Rotas integradas de produção de diferentes bioprodutos a partir da borra de café (PB- Processos da Biorrefinaria; RS - Resíduos; BC- Biocombustível; CP- Co-productos).....	44
Figura 20 –	Biorrefinaria da borra de café visando produzir bioadsorventes, carotenoides, antioxidantes, nanocarvão e PHA (polihidroxiácidos).....	45
Figura 21 –	Configuração de uma biorrefinaria de conversão da borra de café para produção de biodiesel e eletricidade.....	46

Figura 22 – Configuração de uma biorrefinaria de convesão da borra de café para produção de biodiesel e produtos químicos de alto valor agregado.....	46
Figura 23 – Biorrefinaria de borra de café para produção de óleo, etanol e xilitol.....	47
Figura 24 – Biorrefinaria de borra de café para produção de extrato bioativo, proteico e combustível sólido.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Volume de produção de café dos cinco principais países produtores nos últimos cinco anos (milhões de sacas de 60kg).....	15
Tabela 2 –	Volume de consumo de café dos cinco principais consumidores nos últimos cinco anos (milhões de sacas de 60kg).....	15
Tabela 3 –	As dez maiores empresas produtoras de café no Brasil.....	17
Tabela 4 –	Compostos caracterizados na borra de café.....	21
Tabela 5 –	Rendimento de óleo extraído da borra de café e de biodiesel relatado em outros estudos.....	31
Tabela 6 –	Compostos fenólicos identificados na borra de café.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CAFÉ NO MUNDO E NO BRASIL	12
2.1	História do café	12
2.2	O fruto de café	13
2.3	Produção mundial de café	14
2.4	Produção nacional de café	16
3	PROCESSAMENTO DO GRÃO DE CAFÉ	17
3.1	Processamento por via seca.....	19
3.2	Processamento por via úmida	19
3.3	Torrefação.....	20
3.4	Moagem	20
3.5	Resíduos	20
4	COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BORRA DE CAFÉ.....	21
5	BIOCONVERSÃO DA BORRA DE CAFÉ: PRODUTOS E APLICAÇÕES.....	22
5.1	Empresas processadoras de Borra de Café	22
5.2	Produtos.....	24
5.2.1	Bio-óleo	25
5.2.2	Biodiesel.....	27
5.2.3	Biogás.....	31
5.2.4	Pellets	34
5.2.5	Compostagem	37
5.2.6	Fungos	39
5.2.7	Bioativos.....	40
5.2.8	Biorrefinarias	43
6	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	48
7	CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O café é a segunda bebida mais consumida do mundo e uma das commodities mais negociadas internacionalmente. Os principais países consumidores estão na América do Norte, Europa, Ásia-Pacífico, América do Sul, Oriente Médio e África. Considerada uma bebida acessível e conveniente, o café como produto pode ser encontrado como grãos inteiros, café moído, café instantâneo e café em cápsulas (MORDOR INTELLIGENCE, 2023).

O preparo da bebida de café é uma prática comum em todo o mundo, seja nos lares ou em cafeterias. Seu preparo pode ser feito de várias formas, o mais comum é por meio da infusão do café em pó em água quente em um filtro, extraíndo assim todos seus aromas. No entanto, o processo de extração do café desde a colheita do grão até o preparo da bebida gera grandes quantidades de resíduos, sendo a borra de café um deles.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2022), de todos os tipos de resíduo sólido gerado no Brasil, o principal é a matéria orgânica com 45,30% do total. Essa porcentagem representa 37 milhões de toneladas de lixo orgânico por ano, onde apenas 1% é reaproveitado e 99% é destinado aos aterros sanitários.

A borra de café faz parte dos resíduos orgânicos que são enviados para os aterros sanitários, onde sua degradação libera gás metano, um gás nocivo à atmosfera. Com grande potencial de reaproveitamento, muitos estudos têm sido realizados sobre a valorização da borra de café e suas aplicações. Composta por carboidratos, proteínas, lipídeos e compostos fenólicos, a borra de café pode ser usada para produção de biocombustíveis, cosméticos e fármacos, biomateriais e na indústria de alimentos (HOHMANN, 2021).

Assim, o objetivo deste trabalho foi fazer um levantamento bibliográfico das pesquisas atuais que estão sendo feitas sobre as alternativas de destinação da borra de café de interesse ecológico e comercial. Pesquisar sobre o uso da borra de café é importante por vários motivos, principalmente relacionados à sustentabilidade e ao aproveitamento de resíduos.

A borra de café pode ser reutilizada de diversas maneiras que contribuem para práticas ambientalmente responsáveis. Por exemplo, do ponto de vista da biotecnologia e reutilização, a borra de café possui potencial de reutilização, e a biotecnologia pode desempenhar um papel crucial em transformar esse resíduo em produtos sustentáveis (HOHMANN, 2021). Estudos recentes têm comprovado o potencial no combate ao mosquito da dengue, a borra de café contém substâncias que bloqueiam a reprodução dos ovos do mosquito da dengue (MIRANDA et al., 2021). Portanto, pode ser utilizada como uma medida preventiva contra essa doença em residências. Além disso, frequentemente tem sido utilizado como fertilizante natural, a borra de café é rica em carbono, nitrogênio e outros nutrientes essenciais para o solo (RIBEIRO, 2019).

Na produção de energia, a borra de café pode ser usada como biomassa para a produção de biocombustíveis e geração de energia, o que representa uma alternativa energética renovável (KLUSENER et. al., 2022). Tem potencial como matéria-prima para produzir biodiesel (ASSIS, 2022), já que o óleo essencial extraído da borra de café pode ser utilizado para este fim, e pode viabilizar em pequenas comunidades, o abastecimento de máquinas agrícolas. Neste contexto, esses exemplos mostram que propor alternativas de usos da borra de café é importante por seu papel na economia circular, onde resíduos são transformados em recursos, reduzindo o desperdício e contribuindo para um meio ambiente mais sustentável.

2 CAFÉ NO MUNDO E NO BRASIL

2.1 História do café

Quando se busca a origem do café na literatura em várias referências não tem como não mencionar a Lenda de Kaldi, uma história sobre o pastor de cabras que descobriu o grão de café e seu uso. De acordo com a história, registrada em manuscrito no ano 575 d.C. no Iêmen, um pastor etíope de cabras chamado Kaldi observou que após mastigarem alguns frutos vermelhos de certos arbustos suas cabras ficavam agitadas, com isso o pastor provou do fruto e sentiu seu efeito enérgico (ABIC, 2021). Ao saber desta história um monge decidiu provar deste fruto por meio de uma infusão e percebeu que conseguia se manter acordado com mais facilidade durante suas orações noturnas, com isto a bebida foi espalhada entre outros monges e se tornando mais conhecida (CAFE CULTURA, 2016).

Apesar de existir outras histórias e lendas sobre a origem do café, sabe-se que a planta de café é originária da Etiópia e registros históricos do ano de 575 d.C. indicam que os monges do Iêmen foram os primeiros a utilizar a infusão dos grãos de café como uma bebida energética. Foi somente no século XVI, na Pérsia, que foi desenvolvido o processo de torrefação, tornando o gosto da bebida de café mais semelhante ao gosto do café consumido atualmente (ABIC, 2021). Até o século XVII, a Arábia dominou o cultivo do café e a preparação da bebida, sendo o nome café de origem árabe. Com a propagação da cultura do consumo de café pelos árabes, essa bebida chegou por meio dos holandeses ao continente Europeu a partir de 1615 e logo seu consumo se tornou um hábito entre os europeus (ICO, 2015).

Com grande valor comercial, o café chegou ao Brasil em 1727 e teve o início de seu cultivo nas regiões Norte (Pará) e Nordeste (Maranhão) do país. Com a expansão das plantações de café na região sudeste do país entre 1800 e 1850, o cultivo de café ganhou força no Vale do Rio Paraíba, nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, onde começa a fazer parte de um ciclo econômico se tornando uma das mais importantes fontes de receita do Brasil (ICO, 2015). O

café se tornou o principal produto de exportação, impulsionando o desenvolvimento de várias cidades e estabelecendo o Brasil como o maior produtor mundial, com 40% da produção global. (CAFE CULTURA, 2016).

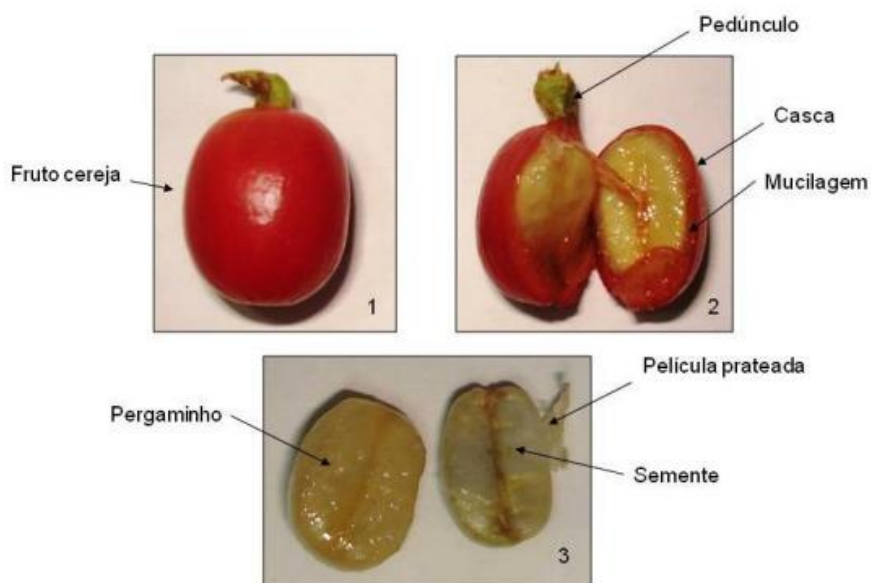
Com a grande demanda pela bebida de café na Europa foi necessário criar processos mais ágeis de fazer a bebida e foi durante a revolução industrial que surgiu a ideia de produzir café em máquinas de vapor. Foi na Itália que surgiu o primeiro protótipo de uma máquina de café, inventada por Angelo Moriondo em 1884. Esta máquina funcionava por meio de uma caldeira com água que aquecia o líquido e o transportava para um duto que continha o pó de café, esta solução era levada então até uma outra caldeira de onde saía o café pronto. Em 1901 na Itália, Luigi Bezzera aperfeiçoou a máquina de Moriondo introduzindo um filtro, porta grãos e um método do café pronto ir direto para a xícara para ser servido (SHIE, 2018). Com isto, muitas outras inovações foram feitas ao passar dos anos até a atualidade, tanto nas máquinas de café como em modos de preparo da bebida.

2.2 O fruto de café

O café pertence à família botânica *Rubiaceae* do gênero *Coffea* com diversas espécies e variedades. Existem pelo menos 25 espécies importantes de café, entre elas a Arábica é a mais cultivada e consumida, correspondendo a mais de 60% da produção mundial de café, logo depois vem a espécie Robusta, também conhecida como Conilon, como a segunda mais produzida (ICO, 2015). Em termo de valor comercial, o Arábica possui um valor de mercado maior devido aos maiores cuidados em seu cultivo, já o Robusta é mais fácil de ser manejado, o que faz com que seu valor comercial seja menor (TUDO SOBRE CAFE, 2022).

O *Coffea arábica* (café Arábica) tem o formato de seus grãos mais achatados e um período de maturação de seus frutos entre 7 e 9 meses, já o *Coffea canephora* (café Robusta) tem um grão ovalado e seu período de maturação é em torno de 11 meses (ICO, 2015). O teor de cafeína do Arábica é 50% menor que do Robusta, mas possui um teor maior em açúcares. Ainda comparando as duas espécies, a característica da bebida do Arábica é mais suave e levemente cítrica enquanto o Robusta é mais amarga e encorpada (TUDO SOBRE CAFE, 2022)

O fruto maduro do café é composto por cinco principais partes: exocarpo (casca), mesocarpo (mucilagem), endocarpo (pergaminho), película prateada e endosperma (semente), como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Morfologia do fruto de café

Fonte: Dalvi (2011)

O exocarpo é a casca que envolve o fruto, é através de sua coloração que determina sua maturação e momento de colheita. Após esta primeira camada encontra-se a polpa do fruto (mesocarpo) sendo a parte açucarada do grão, depois a camada do pergaminho (endocarpo), esta é uma membrana que envolve cada semente (endosperma) do grão. A semente ainda é envolta por uma película prateada antes do pergaminho (DALVI, 2011).

O momento ideal de colheita do fruto de café é quando este se encontra no estágio cereja de maturação apresentando coloração vermelha, mais comum, ou amarela. Porém, em uma mesma planta é possível encontrar frutos em diferentes estágios de maturação (SENAR, 2017).

Os estágios de maturação do fruto começam com o estágio chumbinho, onde o fruto ainda é muito pequeno, depois passa para o estágio verde onde possui uma alta adstringência e o fruto atinge seu tamanho final, depois de um tempo o fruto amadurece aumentando o teor de açúcares, mudando de cor e atingindo o estágio cereja, considerado o ideal para ser colhido. Os estágios finais ocorrem com a secagem gradativa do fruto, onde passa para o estágio boia que é o fruto seco com casca e o estágio passa, onde o café já tem uma coloração preta com estágio avançado de maturação (SENAR, 2017).

2.3 Produção mundial de café

O café faz parte das maiores commodities do mundo, sendo superado apenas pelo petróleo (PANKRATYEVA, 2018), mostrando sua importância na economia mundial. Cerca de 170 milhões de sacas de café de 60 quilos são produzidas anualmente no mundo por 55 países,

onde o Brasil é o maior produtor e exportador seguido do Vietnã e Colômbia. Os maiores importadores de café são a União Europeia, Estados Unidos e Japão (USDA, 2023).

As Tabelas 1 e 2, de acordo com os dados do *United States Department of Agriculture* (2023) – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos –, mostram os volumes de produção e de consumo, respectivamente, dos cinco principais países produtores e consumidores de café nos últimos cinco anos. É importante destacar que os dados de produção e consumo de café contemplam apenas as espécies Arábica e Robusta.

Tabela 1 – Volume de produção de café dos cinco principais países produtores nos últimos cinco anos
(milhões de sacas de 60kg)

	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
Brasil	66.500	60.500	69.900	58.100	62.600
Vietnam	30.400	31.300	29.000	31.580	29.750
Colômbia	13.870	14.100	13.400	11.800	11.300
Indonésia	10.600	10.700	10.700	10.580	11.850
Etiópia	7.350	7.475	7.600	8.150	8.270

Fonte: Adaptado de USDA (2023)

Tabela 2 – Volume de consumo de café dos cinco principais consumidores nos últimos cinco anos
(milhões de sacas de 60kg)

	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
União Europeia	42.092	40.264	41.286	41.862	41.025
Estados Unidos	27.162	26.049	25.937	26.723	26.333
Brasil	23.200	22.994	22.280	22.340	22.450
Japão	7.897	7.610	7.354	7.210	7.148
Filipinas	6.125	6.120	6.605	7.190	7.165

Fonte: Adaptado de USDA, 2023

As projeções de consumo mundial de café estimam que a demanda global deverá ter um crescimento médio de 2% ao ano até 2030, levando a produção de 209 milhões de sacas no mundo. A Figura 2 mostra o consumo mundial a partir do ano 2000 até a projeção para o ano 2030 (EMBRAPA, 2023). O gráfico também mostra a porcentagem de participação do Brasil como produtor para suprir a demanda mundial.

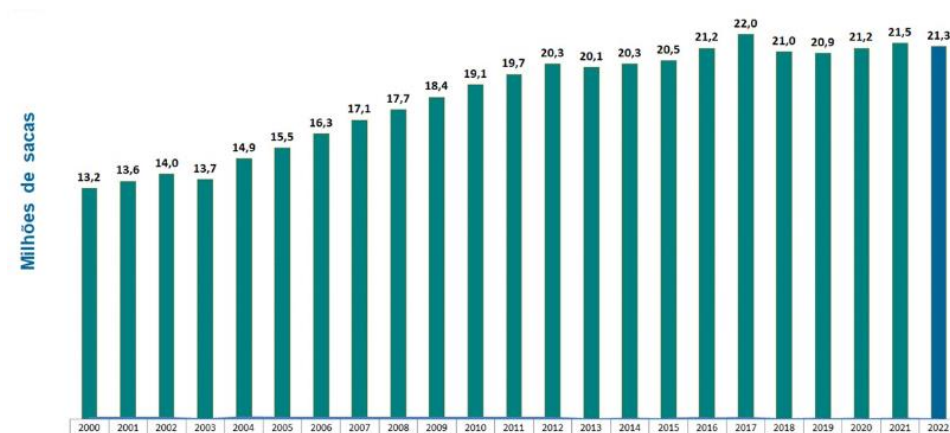
Figura 2 – Demanda mundial de café e projeção para 2030

Fonte: EMBRAPA (2023)

2.4 Produção nacional de café

O Brasil é o maior produtor mundial de grãos de café e o segundo maior país consumidor. Sua produção representa cerca de um terço da safra mundial, com 60% da produção destinada à exportação e 40% para o consumo interno (EMBRAPA, 2023).

Em relação ao consumo interno de café, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Café (2023) nos últimos dez anos o consumo médio de café ultrapassou 20 milhões de sacas de 60 quilos anuais, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Consumo nacional de café nos últimos vinte e dois anos

Fonte: ABIC (2023)

O Brasil abriga cerca de 300 mil estabelecimentos produtores de café, sendo que 82% são classificados como cafeicultura familiar. Os municípios produtores se encontram nos estados de Minas Gerais, sendo o maior produtor, São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Rondônia, Paraná, Rio de Janeiro, Goiás, Mato Grosso, Pará e Amazonas (EMBRAPA, 2023).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2022), a cafeicultura brasileira é uma das mais sustentáveis no mundo, sua produção é desenvolvida por meio de legislações trabalhistas e ambientais rigorosas que garantem a melhor condição de vida para os trabalhadores e a preservação da flora e fauna nativa.

No cenário atual, as principais empresas produtoras de café, considerando o processamento de torrefação e moagem, que atuam no Brasil estão listadas na Tabela 3, onde metade estão localizadas no estado de Minas Gerais.

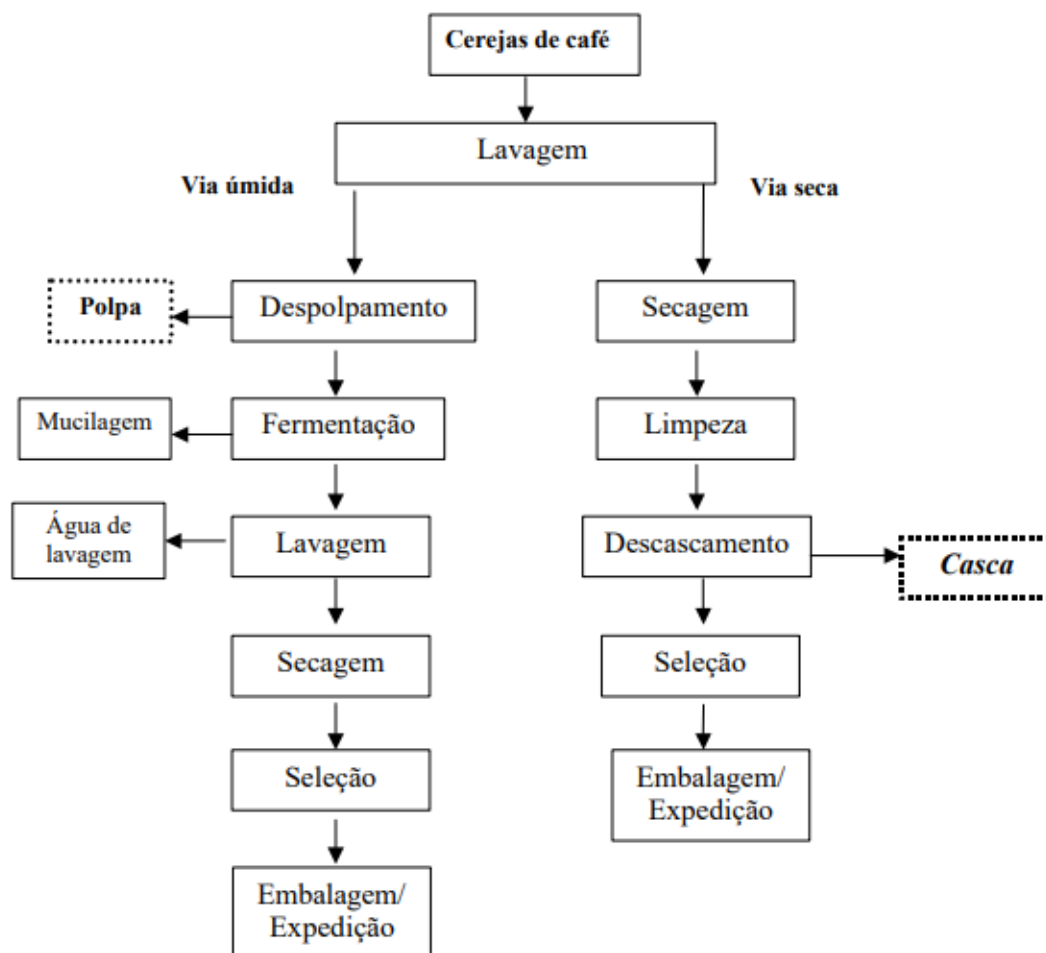
Tabela 3 – As dez maiores empresas produtoras de café no Brasil

Classificação	Empresa	Estado
1	CAFE TRES CORACOES S.A	Minas Gerais
2	CAFE BOM DIA S.A. EM	Minas Gerais
3	CAFE UTAM	São Paulo
4	TRES CORACOES ALIMENTOS S.A.	Ceará
5	3CAFFI INDUSTRIA E COMERCIO DE CAPSULAS S.A	Minas Gerais
6	INDUSTRIAS ALIMENTICIAS MARATA	Sergipe
7	MELITTA	São Paulo
8	CAFE ORFEU	Minas Gerais
9	CAFE DO SITIO	Distrito Federal
10	UNIQUE CAFES ESPECIAIS	Minas Gerais

Fonte: Adaptado de Econodata (2023)

3. PROCESSAMENTO DO GRÃO DE CAFÉ

Após a colheita os grãos de café são encaminhados para o processamento onde passam por etapas de obtenção do café verde por meio da secagem, que pode ser por via seca ou úmida, seguindo posteriormente para a torrefação e moagem. Na Figura 4, é apresentado um fluxograma do processamento do grão de café.

Figura 4 – Fluxograma das etapas do processamento do grão de café

Fonte: Soccol (2002)

A primeira etapa do processamento dos grãos de café após a colheita consiste na separação e limpeza dos grãos onde são retiradas impurezas provenientes da colheita como terra, pedras, folhas e gravetos, assim como frutos verdes, muito maduros ou danificados. Esta limpeza e seleção pode ser feito por meio de peneiramento e por flutuação em tanques de lavagem com água onde, em função da densidade, são separados os cafés boias (grãos mais secos que contêm ar dentro), secos, brocados, mal formados e verdes dos frutos perfeitos (ou cerejas) (ICO, 2015).

Após a etapa de limpeza os grãos passam pelo processo de secagem que pode ser feito de duas maneiras: por via seca ou por via úmida. No Brasil, quase 90 % do café Arábica é processado por via seca, esse método também é muito usado na Etiópia, Haiti, Paraguai e um pouco na Índia e Equador. Os demais países produtores de café Arábica usam o método por via úmida no processamento dos grãos. O café Robusta costuma ser processado apenas pela via seca (ICO, 2015).

3.1 Processamento por via seca

No processo por via seca, também conhecido como natural, o fruto é mantido inteiro, com sua casca, pergaminho, mucilagem e grãos.

Logo após a limpeza e lavagem, os frutos de café cereja seguem diretamente para a secagem em terreiro (podendo ser suspenso ou não) ou secador, ou mesmo em um misto entre terreiro e secador.

Neste processo, o café deve atingir seu teor máximo de umidade de 12,5% em torno de quatro semanas. Após a secagem, as cerejas secas, denominadas café em coco, passam por descascadores removendo toda a parte externa das cerejas até obter somente os grãos de “café verde” (DALVI, 2011). O café verde é a nomenclatura usada para os grãos de café obtidos após a secagem e o beneficiamento do café, diferente do fruto verde de café que são frutos não maduros. Após a obtenção do café verde, este é separado, classificado e enviado para vendas ou para o processo de torrefação e moagem.

3.2 Processamento por via úmida

No processamento de café por via úmida, após as etapas de separação e limpeza, os frutos de café são submetidos ao descascamento ou despolpamento feitos por máquinas.

Em descascadores mecânicos, os frutos verdes de café podem ser processados juntos com as cerejas, uma vez que os frutos verdes são mais difíceis de serem descascados estes saem inteiros do descascador mecânico, separando-se do café cereja descascado. Sendo assim, o descascador mecânico remove a casca e a polpa do café cereja obtendo no final do processo: o café cereja descascado coberto de mucilagem, as cascas com a polpa e os frutos verdes (DA SILVA, 2012).

Após sair do descascador, o café cereja descascado pode ser levado para terreiros de secagem ou secadores mecânicos, porém, dependendo das condições do ambiente, o café pode sofrer com contaminação devido ao crescimento de microrganismos na mucilagem. Desse modo, para evitar a contaminação, a cereja despolpada segue para grandes tanques de fermentação com água onde a mucilagem é degradada por enzimas naturais (ICO, 2015). A remoção da mucilagem também pode ser feita por meio mecânico com um equipamento denominado desmucilador.

Após a remoção da mucilagem, o café degomado (sem a mucilagem) é lavado com água limpa e levado para os terreiros de secagem ou secadores mecânicos, onde se obtém o café verde (DA SILVA, 2012).

3.3 Torrefação

Após a secagem, os grãos de café verde seguem para a etapa de torrefação onde são submetidos ao aquecimento gradual em um torrador, do qual normalmente é um tambor rotativo horizontal, chegando a temperaturas entre 180 °C e 240 °C durante um intervalo de tempo entre 15 a 20 minutos (PAIVA, 2022).

É nesta etapa que o grão de café ganha sabor e aromas diferentes dependendo do grau de torrefação, sendo quanto maior o grau de torrefação, mais escura será a cor do grão e mais intenso será o aroma e sabor do café (PAIVA, 2022).

3.4 Moagem

Nesta etapa, os grãos de café torrados passam por um moedor onde são quebrados em partículas que variam em tamanho e espessura, sendo sua granulometria padronizada dependendo do tipo de moagem pretendida podendo ir de extra fina a grossa.

A importância da moagem do café está na interação do café moído com a água, no momento de infusão onde ocorre a extração dos compostos de café que dão o sabor a bebida. Tudo depende do tanto de compostos deseja-se extrair do café para chegar a um determinado sabor (DALVI, 2011).

3.5 Resíduos

Independente da via utilizada no processamento do grão do café, uma grande quantidade de resíduos é produzida.

No processamento por via seca são gerados apenas resíduos sólidos, sendo estes a casca, polpa e pergaminho. Por via úmida, além dos resíduos sólidos de casca, polpa e mucilagem, há o resíduo líquido proveniente da água de lavagem e fermentação (DURÁN et al., 2016).

Um dos resíduos significantes do processamento do café após seu beneficiamento é a borra (Figura 5) gerada durante a preparação da bebida, quando a água quente ou vapor passa pelos grãos de café moídos para extração de substâncias aromáticas.

A borra de café é um resíduo gerado em larga escala, não só pelo consumo diário da bebida de café no dia a dia ao redor do mundo, mas também pela indústria de café solúvel. Estima-se que para cada tonelada de café obtém-se 480 kg de borra (HERMANN, et al., 2019) e a média de borra de café gerada no Brasil é de 1,1 milhão de toneladas por ano (HOHMANN, 2021).

Figura 5 – Exemplo de borra de café

Fonte: Comunicaffe (2021)

A fim de valorizar a borra de café e usá-la como matéria-prima para produção de bioprodutos, é necessário conhecer sua composição físico-química para determinar sua aplicação.

4. COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BORRA DE CAFÉ

Antes de trabalhar com a borra de café é necessário estudar sua composição físico-química a fim de entender suas propriedades e identificar como este material pode ser valorizado e utilizados como matéria-prima para fabricação de outros produtos. Pensando nisso, muitos autores trabalharam na determinação da composição físico-química da borra de café usando diversos métodos analíticos de caracterização.

A composição físico-química da borra de café é complexa e variável, dependendo de diversos fatores, como o tipo de café, o método de preparo e o grau de torrefação. Em geral, os principais componentes da borra de café são os carboidratos, lipídios, proteínas, ligninas e minerais, além dos compostos fenólicos e da cafeína (BOMFIM *et al.*, 2023). Na Tabela 4 é mostrado alguns estudos de caracterização dos compostos presentes na borra de café.

Tabela 4 – Compostos caracterizados na borra de café

Composto	Unidade	Referências					
		Ballesteros <i>et al.</i> (2014)	Colantoni <i>et al.</i> (2021)	Puello <i>et al.</i> (2018)	Mussato <i>et al.</i> (2011)	Pujol <i>et al.</i> (2013)	Moura (2016)
Celulose	%	12,4	nd	30,58	nd	23,07	49,27
Hemicelulose	%	39,1	nd	20,2	36,7	nd	nd
Lignina	%	23,9	nd	17,91	nd	23,18	nd
Proteína	%	17,44	nd	10,03	13,6	nd	15,02

Lipídeos	%	2,29	nd	14,7	nd	nd	9,08
Cinza	%	1,3	0,9	1,71	1,6	nd	2,79
Nitrogênio	%	2,79	1,4	2,01	nd	1,25	nd
Carbono	%	47,18	68,52	47,9	nd	58,47	nd
C/N		16,91	48,94	23,83	nd	46,78	nd
Fibra alimentar	%	60,46	nd	nd	nd	nd	23,84
Potássio	mg/kg	11700	1684,12	nd	3549	234	nd
Cálcio	mg/kg	1200	250,09	nd	777,4	634,5	nd
Magnésio	mg/kg	1900	1981,71	nd	1293,3	125,5	nd
Enxofre	mg/kg	1600	nd	nd	nd	nd	nd
Fósforo	mg/kg	1800	nd	nd	1475,1	nd	nd
Ferro	mg/kg	52	9,87	77,5	118,7	236,5	nd
Alumínio	mg/kg	22,3	21,44	nd	279,3	nd	nd
Estrôncio	mg/kg	5,9	10,51	nd	nd	nd	nd
Bário	mg/kg	3,46	3,17	nd	nd	nd	nd
Cobre	mg/kg	18,66	9,82	12,8	32,3	42,5	nd
Sódio	mg/kg	33,7	37,15	nd	nd	478	nd
Manganês	mg/kg	28,8	10,52	50,98	40,1	31	nd
Boro	mg/kg	8,4	10,6	nd	nd	nd	nd
Zinco	mg/kg	8,4	3,57	nd	15,1	11	nd
Cobalto	mg/kg	15,18	nd	nd	nd	nd	nd
Níquel	mg/kg	1,23	1,23	nd	nd	nd	nd

*nd = não determinado

Algumas diferenças entre os valores dos compostos analisados nos estudos podem ser atribuídas ao processo de extração da borra de café e o tipo de grão usado, além de diferentes procedências geográficas e diferentes sistemas de produção de café (COLANTONI *et al.*, 2021).

A composição da borra de café mostra seu potencial de bioconversão em produtos como adubo, devido seus nutrientes e alto teor de proteínas, biocombustível líquido ou sólido com a sua fração lipídica e celulósica, além de seu potencial antioxidante que pode ser usado na indústria de cosméticos e alimentícia.

5. BIOCONVERSÃO DA BORRA DE CAFÉ: PRODUTOS E APLICAÇÕES

5.1 Empresas processadoras de Borra de Café

Algumas empresas já fazem o processamento da borra de café convertendo em produtos de valor agregado. Uma das mais conhecidas neste ramo é a Kaffe Bueno da Dinamarca que transforma a borra de café em ingredientes ativos e funcionais para cuidados pessoais e nutrição

humana como óleos, farinhas e biopolímeros. Em setembro de 2023 inaugurou a primeira biorrefinaria de café do mundo (KAFFE BUENO, 2023).

A UpCircle é uma empresa com sede em Londres que usa a borra de café como matéria-prima para a produção de esfoliantes faciais (Figura 6) e corporais além de usar o óleo extraído da borra em cremes para os olhos. Sua principal fonte de coleta de borra de café vem das cafeterias (WASTE, 2023).

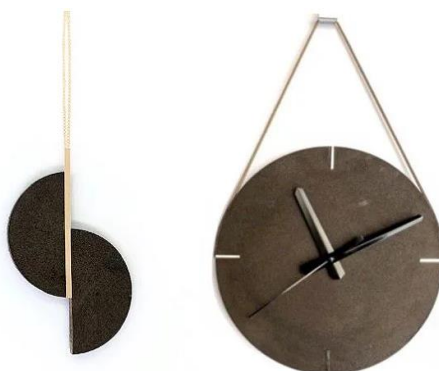
No ramo do artesanato temos a empresa Kaffeeform, fundada em 2015 na Alemanha, que tem como principal produto copos feitos de borra de café e outros polímeros vegetais. Atualmente a empresa coleta a borra de cafeterias em Berlim (KAFFEEFORM, 2023). Outro exemplo é a empresa brasileira Recoffee, que produz biojoias e peças decorativas com a borra de café. Sua produção artesanal é livre de aditivos químicos e o material desenvolvido tem características rígidas, de baixa densidade e biodegradável (RECOFFE, 2023). A Figura 7 mostra um exemplo das peças da marca Recoffee que são comercializadas.

Figura 6 – Esfoliante facial da UpCircle feito de borra de café



Fonte: UpCircle (2023)

Figura 7 – Exemplo de um colar e de um relógio da empresa Recoffee produzidas a partir da borra de café



Fonte: Recoffee (2023)

Na área de compostagem, tem a empresa Envar Composting Ltd, localizada em Londres, onde trabalha com a coleta da borra de café, seja de residências ou empresas, processo de limpeza da borra e posteriormente a compostagem (ENVAR, 2023). Ainda podemos citar a empresa processadora de café Bestpresso, dos Estados Unidos, da qual tem um programa de reciclagem onde os clientes retornam de forma gratuita para a empresa as capsulas de café usadas contendo a borra que são encaminhadas para a compostagem (BESTPRESSO, 2022).

No ramo da agricultura, também podemos citar os produtores de cogumelos que usam a borra de café como substrato. Um exemplo é a start-up Nãm que em parceria com a produtora de café Delta Café em Portugal, a start-up recolhe a borra de café gerada pela Delta e usa em sua produção de cogumelos. A Nãm já recolheu 200 toneladas da Delta Café e o composto residual da produção de cogumelos está sendo utilizado como fertilizante (MARKETEER, 2023).

Uma empresa que processa borra de café é a INNOVACARB, que utiliza os resíduos de café como matéria-prima para produzir carvão ativado vegetal, ou carvão ativado, que é utilizado para purificar água. A empresa está focada em um processo de produção sustentável e possui um modelo de negócio que engloba a coleta, produção sistemática e comercialização deste produto, com o objetivo de processar 50 toneladas de borra de café por ano. Eles são capazes de fornecer carvão ativado para a indústria cosmética e para a purificação de água, beneficiando comunidades com acesso limitado a água potável através de parcerias com ONGs e Organizações da Sociedade Civil (OSCs) (SDSNMX, 2023).

A EcoBean é uma empresa de tecnologia que se dedica a reduzir o desperdício de café, transformando a borra de café usada em produtos químicos sustentáveis e outros produtos. Eles procuram usar a economia circular, garantindo que a borra de café coletada seja reciclada em novos produtos. A empresa colabora com parceiros em todo o mundo para encontrar novas maneiras de reutilizar a borra de café e criar uma mudança sustentável, onde já colaborou com projetos de extração de óleo da borra de café para ser usado como bioaditivo em combustíveis, na logística para implementação de serviços de coleta de borra de café, além de terem seus próprios produtos como vasos de flores biodegradáveis, copos e canudos ecológicos, todos feitos com borra de café. Essas iniciativas da EcoBean também ajudam a reduzir as emissões de CO₂, apoiando práticas comerciais ecologicamente corretas e alinhando-se com estratégias climáticas neutras (ECOBAN, 2023).

5.2 Produtos

As empresas processadoras de borra de café ainda são poucas se comparado com o volume de borra de café produzido anualmente no mundo e seu potencial de bioconversão em produtos de valor agregado. Neste tópico iremos abordar os principais produtos derivados da borra de café que estão sendo estudados.

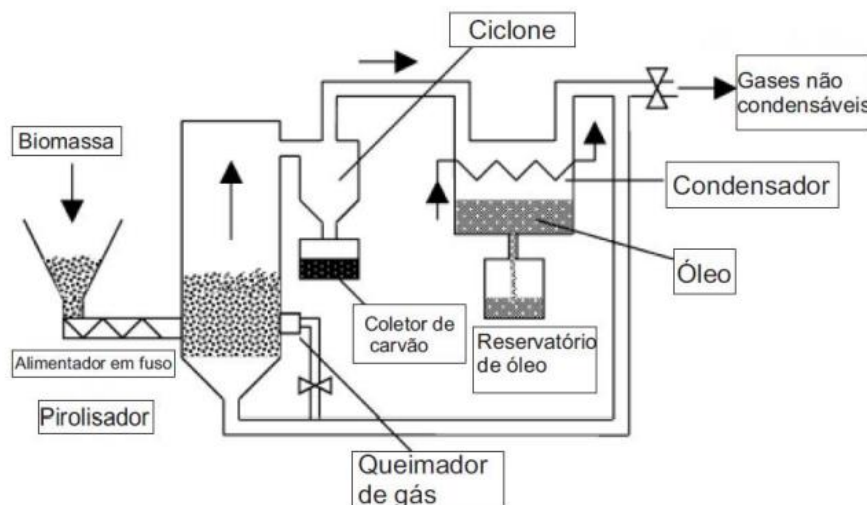
5.2.1 Bio-óleo

A pirólise de biomassa é um processo de conversão térmica no qual os componentes da biomassa, como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, são quebrados em substâncias menores resultando em produtos como finos de carvão, gases, substâncias voláteis e bio-óleo (JÚNIOR, 2017).

São empregadas diferentes técnicas de pirólise dependendo das condições e dos produtos de interesse (sólido, líquido e gás). A pirólise lenta acontece em baixas temperaturas (menores de 500 °C) com uma taxa de aquecimento baixa e um longo tempo de residência de horas ou dias favorecendo a formação do carvão vegetal (FERREIRA, 2014). A pirólise rápida tem um curto tempo de residência de vapor entre 0,5 e 10 segundos, com taxa de aquecimento entre 10 e 200 °C/s e temperatura mais altas entre 450 e 850 °C, favorecendo a formação do bio-óleo (JÚNIOR, 2017).

O bio-óleo, também conhecido como óleo de pirólise, é um líquido marrom escuro de aspecto viscoso. É uma mistura complexa de compostos oxigenados incluindo água, partículas de carvão e metais alcalinos dissolvidos. Sua composição varia com o tipo de biomassa, as condições de processamento e a eficiência na separação de impurezas (MELO, 2019). Devido seu alto poder calorífico, é um produto altamente desejável, fácil de transportar e armazenar e com baixo teor de nitrogênio e enxofre. Pode ser utilizado diretamente como combustível de caldeiras e fornalhas e pode ser convertido em combustíveis veiculares como a gasolina. Por ser um combustível renovável, é uma alternativa sustentável ao uso de combustíveis fósseis (CHIES, 2016)

A produção do bio-óleo por meio da pirólise rápida consiste na decomposição térmica da biomassa na ausência do oxigênio em uma temperatura de aproximadamente 500 °C e um tempo de residência curto (BRIDGWATER, 2003). A Figura 8 mostra o fluxograma resumido da produção de bio-óleo por meio da pirólise rápida.

Figura 8 – Esquema de produção de bio-óleo

Fonte: Rocha (2016)

O processo geral de pirólise da biomassa começa com a remoção da umidade da biomassa, essa etapa ocorre em temperaturas acima de 105 °C (JÚNIOR, 2017), logo em seguida a biomassa desidratada é encaminhada para o reator (forno) onde ocorrerá o processo de degradação térmica da matéria-prima em diferentes faixas de temperatura, formando assim o carvão e o gás. Em seguida, o gás e o carvão formados são transportados para o ciclone para serem separados, onde o carvão é retirado pelo funil do ciclone e o gás segue pela tubulação para o condensador onde uma fração desse gás é condensado em bio-óleo (ROCHA, 2016).

Estudos apontam que a borra de café é uma matéria-prima promissora para a produção de bio-óleo, como mostrou Almallahi *et al.* (2023) que testaram a produção de bio-óleo a partir de borra de café usando um reator de leito fluidizado, variando a temperatura e o tempo de reação chegando ao rendimento máximo de 45% de bio-óleo a 550 °C e com um poder calorífico de 41 MJ/kg. Primaz *et al.* (2018) utilizou um reator de leito fixo e chegou a um rendimento de bio-óleo um pouco maior de 51,61 % a uma temperatura de 500 °C.

Hoang *et al.* (2022) fizeram uma comparação entre a pirólise rápida e a pirólise catalítica com diferentes tipos de catalisadores em um reator de leito fluidizado, mostrando que a pirólise não catalítica atingiu o maior rendimento de bio-óleo, com 59,43% em peso, a uma temperatura de 733 K, porém, enquanto o poder calorífico dos bio-óleos produzidos por pirólise rápida não catalítica variaram de 27,91 a 37,80 MJ/kg, o bio-óleo produzido por pirólise catalítica usando hematita apresentou a maior energia total de 38,99 MJ/kg.

Em diferentes estudos o bio-óleo da borra de café mostrou potencial para a produção de combustíveis químicos e de segunda geração, com aplicações em biodiesel, alternativas de

combustíveis, produtos químicos finos e matérias-primas para a indústria química. Essa análise avançada do bio-óleo contribui para a avaliação do desenvolvimento de bio-refinarias.

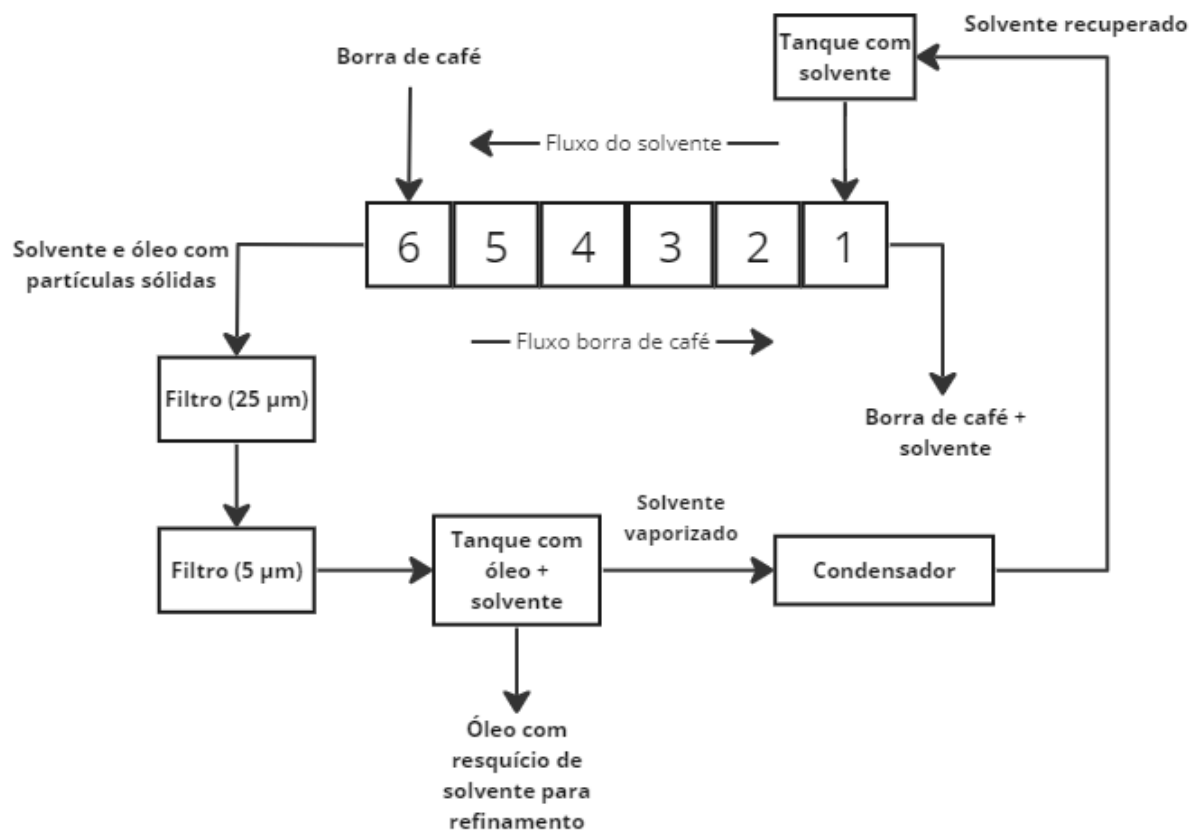
5.2.2 Biodiesel

O biodiesel é um combustível produzido a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais o que o torna uma fonte alternativa de energia aos combustíveis fósseis podendo substituir total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo em motores (BRASIL, 2011). Como fonte de óleo vegetal, a borra de café é uma biomassa que seca apresenta aproximadamente 15 % de óleo e sua transformação em biodiesel ocorre em pelo menos três etapas: extração do óleo da borra de café, síntese do biodiesel e purificação do produto final (CALDEIRA, 2015).

Para o processo de extração do óleo da borra de café pode ser utilizado diferentes técnicas de separação, sendo as mais usadas a extração sólido-líquido com solventes orgânicos, extração assistida por ultrassom ou micro-ondas, extração com fluidos supercríticos e processos de extração de alta pressão (MUANGRAT; PONGSIRIKUL, 2019). As pesquisas mais encontradas na literatura usam a extração do óleo com solventes orgânicos, sendo o hexano o mais usado, porém, os estudos da extração do óleo da borra de café usando CO₂ como fluido supercrítico vem crescendo por ser uma tecnologia mais sustentável e já usada para extração de óleo de outros materiais vegetais (MUANGRAT; PONGSIRIKUL, 2019).

Usando a extração com solvente, Efthymiopoulos et. al., (2017) estudou este método em uma planta piloto usando um extrator em batelada de fluxo contracorrente com capacidade de 8 kg por batelada. A Figura 9 mostra o esquema da planta piloto.

Figura 9 – Planta piloto de um extrator de solvente contracorrente usada para extração do óleo da borra de café



Fonte: Adaptado de Efthymiopoulos et. al., (2017)

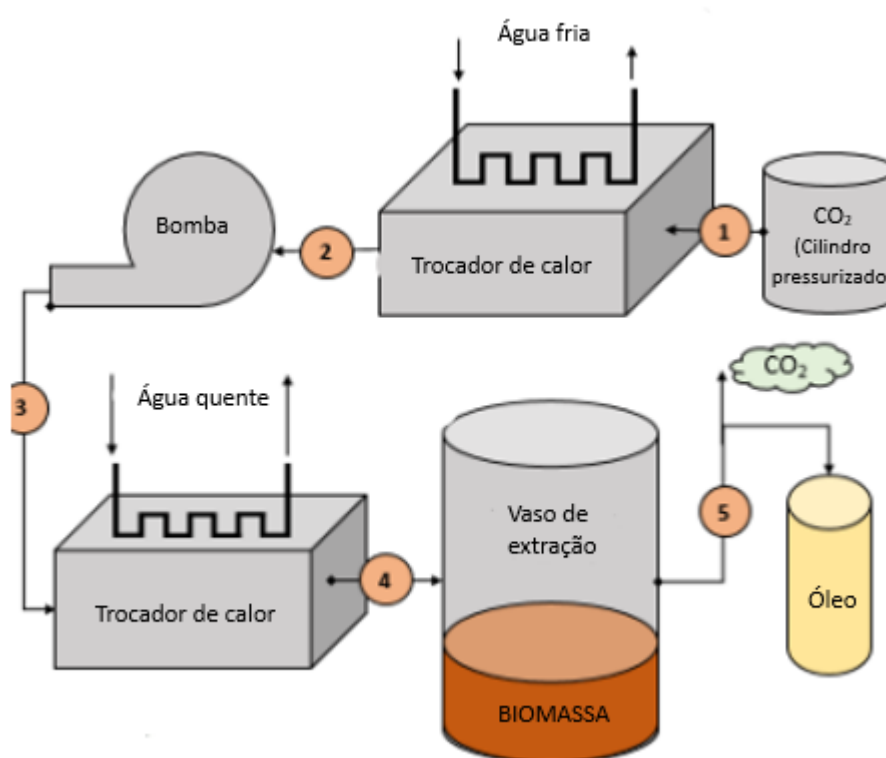
Como mostra a Figura 9, a borra de café seca (umidade de 5%) é enviada ao compartimento 6 enquanto o solvente é adicionado no compartimento 1 e ambos estão em fluxo contracorrente. Na sequência deste processo, o óleo é coletado junto com o solvente e filtrados para remoção de partículas sólidas, em seguida essa mistura é aquecida em um tanque de coleta para que o solvente evapore e retorne para o processo e o óleo resultante ainda com traços de solvente é submetido a evaporação rotativa para refino (EFTHYMIPOULOS et. al., 2017). Neste estudo, operando o processo a uma temperatura de 60 °C, pressão de 770 mbar, os resultados foram rendimentos de 17,3% de óleo em 1h de duração e 20,8% de óleo em 2h de duração da batelada.

Battista et.al., (2021) fizeram a extração do óleo da borra de café somente em escala laboratorial usando um extrator *Soxhlet* e hexano como solvente obtendo um rendimento de 10% de óleo. Neste estudo, o autor também produziu biocombustível por meio da transesterificação do óleo usando metanol na proporção de 1:8 (óleo:metanol) e hidróxido de

potássio (KOH) como catalisador na concentração de 2% em uma temperatura de 60 °C e tempo de duração de 2h, resultando no rendimento de 86% de biodiesel.

Como já mencionado, o método de extração do óleo da borra de café usando CO₂ como fluido supercrítico tem sido estudado como alternativa, como mostra Klusener et.al., (2022) em seu estudo dimensionou uma planta piloto com o processo de extração do óleo da borra de café, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma da extração do óleo da borra de café usando CO₂ como fluido supercrítico



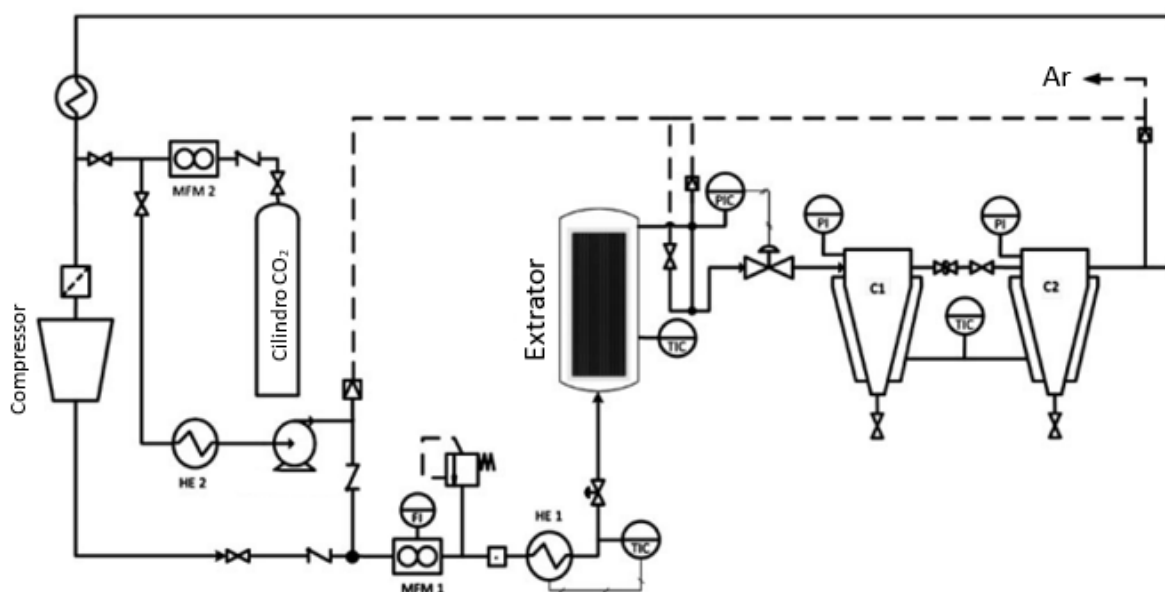
Fonte: Adaptado de Klusener et.al., (2022)

Neste processo, o CO₂ gasoso é enviado para um trocador de calor onde é resfriado ficando no estado de líquido saturado; uma bomba de alta pressão envia esse líquido para outro trocador de calor onde o fluido é aquecido até atingir sua condição supercrítica, neste estado é enviado para o tanque de extração onde está a borra de café seca, onde ocorre a mistura com a biomassa e o óleo é extraído da borra. Essa mistura de fluido mais óleo é separada ao deixar o tanque de extração onde o CO₂ é despressurizado retornando ao estado gasoso e o óleo é precipitado, resultando em um rendimento máximo de 9,88% de óleo (KLUSENER et.al., 2022). Ainda neste experimento, o autor usou o óleo extraído para produzir biodiesel usando

metanol na proporção 1:9 (óleo:álcool) e hidróxido de potássio como catalisador em um processo de agitação por 1h a 60 °C, chegando ao rendimento máximo de 84,2%.

Ribeiro et. al., (2013) estudaram a extração do óleo da borra de café por fluido supercrítico em uma planta de alta pressão mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Esquema de uma planta de extração por fluido supercrítico usado para extrair o óleo da borra de café



Fonte: Ribeiro et. al., (2013)

Como mostra a Figura 11, o CO₂ gasoso passa por um compressor de gás para ser comprimido até a pressão de extração desejada, depois é aquecido por meio de um trocador de calor, sendo enviado para o extrator onde entra em contato com a borra de café extraíndo seu óleo onde posteriormente ocorre a despressurização do fluxo de CO₂ e o óleo extraído é separado desse fluxo por meio de dois ciclones em série e o CO₂ é reciclado de volta ao compressor (RIBEIRO et. al., 2013). Esse processo de extração foi feito nas condições de temperatura de 55 °C e pressão de 250 bar, com um rendimento final de 12,1%.

O rendimento de óleo extraído da borra de café pode variar de acordo com os métodos de extração, os solventes usados e outros parâmetros como a variedade de café e suas condições de cultivos (KLUSENER et. al., 2022), assim como sua conversão e rendimento em biocombustível, como mostraram os estudos citados e demais estudos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Rendimento de óleo extraído da borra de café e de biodiesel relatado em outros estudos

Estudo	Rendimento de óleo em base seca (%) p/p	Método	Rendimento de biodiesel (%) v/v
Kusuma et al. (2023)	18,14	Extração Soxhlet	57,32
Nguyen et al. (2020)	12,4	Extração Soxhlet	97,18
Tuntiwiwattanapun e Tongcumpou (2018)	14,8	Extração Soxhlet	88,84
Muangrat e Pongsirikul (2018)	12,14	Extração por fluido supercrítico	-

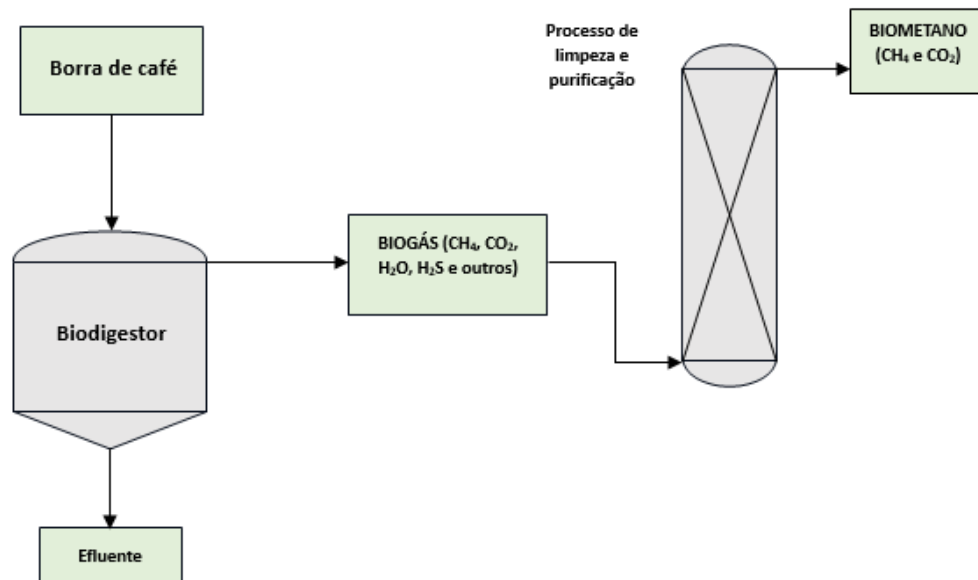
Ainda faltam estudos que mostrem a viabilidade econômica de produzir biodiesel a partir da borra de café em larga escala, um estudo que pode ser citado é de Kamil et. al., (2019) que fez essa análise concluindo que uma planta de produção de biodiesel a partir da borra de café será viável e lucrativa se tiver uma capacidade de 10.000 toneladas de biodiesel/ano.

5.2.3 Biogás

Biogás é um combustível renovável composto principalmente por metano, dióxido de carbono, nitrogênio e outros gases em menores proporções. Devido ao seu alto potencial energético, pode ser usado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica. É obtido por meio da decomposição da matéria orgânica pelo processo de digestão anaeróbia (BARROS, 2021).

O processo usual de obtenção do biogás ocorre em um biodigestor (reator biológico) com ausência de oxigênio e sob condições controladas de temperatura, pH e agitação. Neste processo os microrganismos usados para decompor a matéria orgânica são as bactérias anaeróbias hidrolíticas, acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas, onde cada tipo de bactéria irá agir em diferentes etapas. Com a decomposição da matéria orgânica no biodigestor, o produto desse processo é o biogás e o lodo (efluente), uma pasta composta por sólidos e líquidos resultante do processo (MAHMOUD, 2022). O biogás produzido passa por um processo de limpeza e purificação para obtenção do biometano, o gás combustível de interesse (JOPPER, 2020). A Figura 12 mostra o fluxo da produção do biogás e biometano.

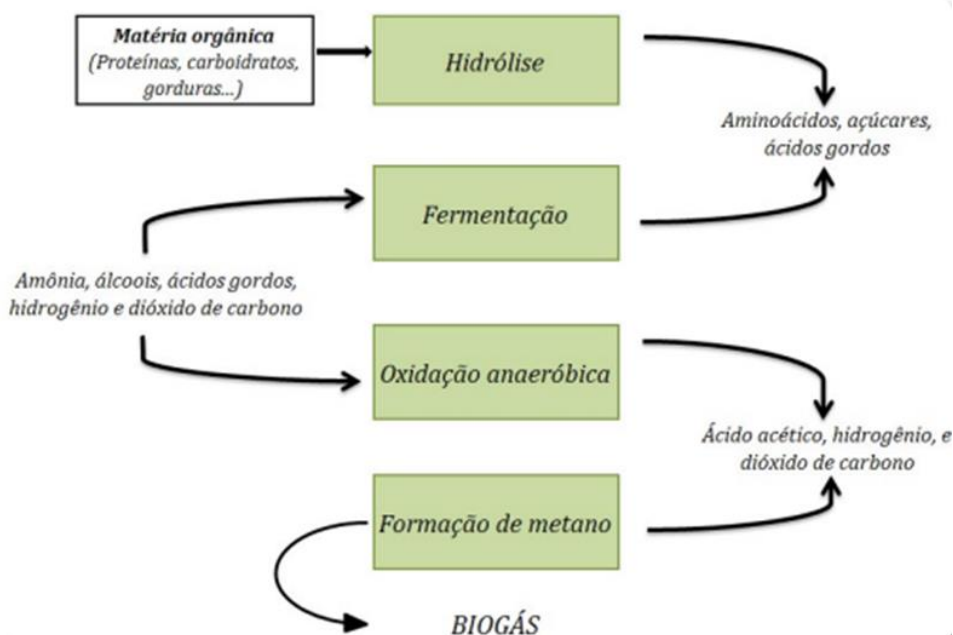
Figura 12 – Fluxograma de produção do biogás e biometano



Fonte: Adaptado de Jopper (2020)

Dentro do reator/biodigestor, a primeira etapa da conversão da matéria orgânica em biogás é a hidrólise. Nesta etapa as bactérias hidrolíticas quebram a matéria orgânica em pequenas moléculas, convertendo assim os compostos orgânicos complexos como proteínas, carboidratos e lipídios, em compostos solúveis, sendo eles os aminoácidos açúcares simples e ácidos graxos. A segunda etapa do processo de digestão é a acidogênese, ou fermentação. Nesta etapa, as bactérias acidogênicas, produtoras de ácidos, transformam os produtos solúveis da etapa anterior em compostos mais simples, como ácidos orgânicos, álcoois e amoníaco, hidrogênio e dióxido de carbono. A terceira etapa do processo é a acetogênese, também conhecida como oxidação anaeróbia, onde as bactérias acetogênicas convertem os compostos resultantes das etapas anteriores em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. A formação de metano é a quarta etapa do processo, também conhecida como metanogênese é a etapa onde bactérias metanogênicas convertem o ácido acético e o dióxido de carbono, além de outras moléculas de menores proporções, em metano, sendo este o principal produto, dióxido de carbono e água (KARLSSON, 2014). Na Figura 13 há um resumo das etapas do processo digestão anaeróbia que ocorre dentro do biodigestor.

Figura 13 – Etapas da digestão anaeróbia em um biodigestor



Fonte: Karlsson (2014)

A borra de café é uma fonte de matéria orgânica com alto potencial de produção de biogás devido sua composição rica em carboidratos e lipídios, podendo ser usada também como complemento para outras fontes de biomassa na digestão anaeróbia (TEIXEIRA, 2019).

Estudos laboratoriais têm sido feitos desde a década de 80 quando Lane (1982) foi um dos primeiros a experimentar a digestão anaeróbia da borra de café usando um digestor em escala laboratorial tendo como substrato a borra de café e inóculo o lodo de um digestor de esgoto municipal, operando em uma temperatura mesófila de 37°C, conseguiu após 80 dias de processo chegar a um resultado de 0,540 m³ de biogás/kg de matéria orgânica seca com uma concentração de metano de 56-63%.

Pesquisas atuais corroboram os resultados de Lane, um exemplo são os resultados alcançados por Tomaz Vitez (2016), no qual estudou a digestão anaeróbia da borra de café sólida usando reator mesófilo em batelada por 22 dias na temperatura de 38°C e inóculo proveniente do fermentador de uma usina de biogás, chegando a uma produção de biogás de 0,500-0,598 m³/kg de matéria orgânica seca e uma concentração 55-61% de metano.

Giroto (2018), fez um pré-tratamento na borra de café com diferentes proporções de NaOH (de 2 a 8%), chegando a resultados eficazes com o aumento da produção de metano de 24% a mais do que com a borra de café sem pré-tratamento. Isso se deve ao fato de o NaOH contribuir para a hidrólise da matéria orgânica complexa, como a lignina existente na borra de café. Em seu experimento, Giroto (2018) usou um reator em batelada nas condições mesófilas

de 35 °C durante 40 dias usando dois tipos de substratos, a borra de café sólida sem tratamento e a borra de café sólida após o tratamento de 24h com NaOH, chegando a resultados de 46% de metano com a borra de café sem tratamento e 51% com a borra de café tratada com 8% de NaOH.

Atelge et al., (2021) utilizaram como pré-tratamento a extração do óleo da borra de café seca e fez a comparação da digestão anaeróbia da borra de café sem tratamento e da borra de café desengordurada nas condições mesófilas de 37 °C por 49 dias. Em seu estudo, o autor mostrou que a borra de café desengordurada teve um maior rendimento com 336 mL CH₄/g SV (sólido volátil) em comparação a borra de café sem tratamento com 310 mL CH₄/g SV. Em seu estudo, Atelge et al., (2021) também fizeram a codigestão da borra de café desengordurada com resíduo de chá, chegando ao maior rendimento de 318 mL CH₄/g SV na proporção de 50:50.

Teixeira (2019) utilizou a codigestão com resíduos alimentares usando borra de café doméstica e industrial em condição mesófila (35 °C) durante 45 dias chegando aos maiores rendimentos de 55% de CH₄ usando a borra de café doméstica e 52% de CH₄ para a borra de café industrial, ambos na proporção de substrato com 25% de borra e 75% de resíduo alimentar.

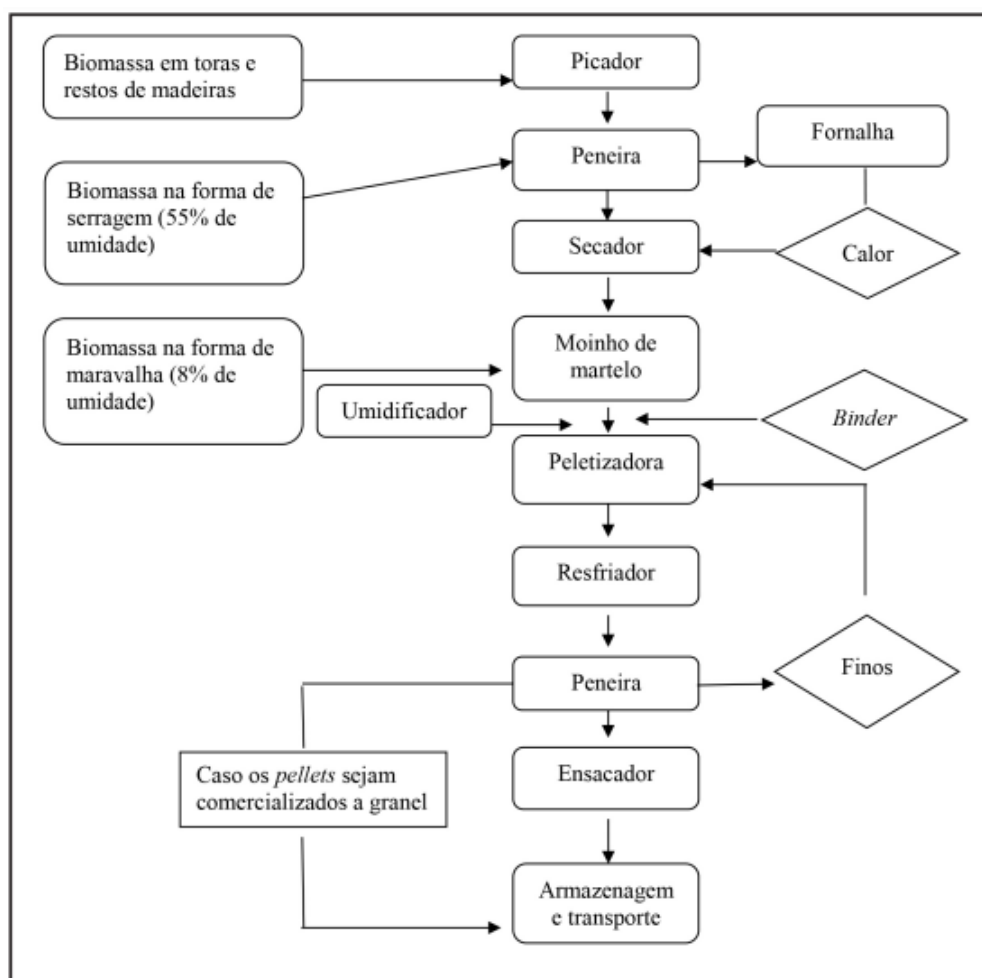
5.2.4 Pellets

Os pellets feitos com biomassa costumam ser produzidos principalmente a partir de resíduos de madeira, materiais agrícolas e restos florestais. Seu processo consiste em compactar a biomassa para ser usada como fonte de energia, sendo uma alternativa aos combustíveis fósseis, podendo ser empregados em usinas de energia, aquecimento de residências, em caldeiras e outras aplicações. O seu formato de pequenas pelotas cilíndricas compactadas também traz outras vantagens como a facilidade de manusear, transportar e armazenar (JAM, 2022).

A primeira etapa do processo de produção de pellets começa com o pré-tratamento da matéria-prima, onde a biomassa precisa ser seca até atingir uma umidade entre 10 a 15%, sendo que essa pequena umidade ajuda na ligação das partículas da biomassa na hora da peletização (JAM, 2022). Com a matéria-prima seca, é necessário uniformizar o tamanho das partículas para melhorar a compactação, essa etapa é feita em um moinho industrial, onde as partículas são reduzidas em tamanhos menores que 3,0 mm (GARCIA, 2010). A próxima etapa é a peletização, onde a biomassa seca e triturada é comprimida através de uma matriz de peletização, sendo está uma chapa de metal com orifícios que gira aplicando pressão e calor para a formação dos pellets. Os pellets precisam ser resfriados, pois saem da máquina com uma temperatura de aproximadamente 95°C e o resfriamento é necessário para estabilização da

lignina (GARCIA, 2010). Alguns produtores de pellets de biomassa utilizam agentes ligantes (binder), como lignossulfonato, amido de milho ou de batata, ou farelo de canola, para melhorar o processo de peletização (QUENO *et al.*, 2019). Após o resfriamento, os pellets passam por uma peneira vibratória para separar os materiais finos e logo em seguida são embalados para distribuição e armazenamento (JAM, 2022). Um resumo do processo de fabricação de pellets é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma do processo de fabricação de pellets



Fonte: Queno *et al.* (2019)

É importante observar que o processo de peletização pode variar dependendo do tipo de matéria-prima e a qualidade dos pellets, como sua densidade e resistência, é essencial para garantir uma queima eficiente em sistemas de energia. Em geral, os pellets têm uma densidade 650 a 700 kg/m³, diâmetro entre 6 e 16 mm, comprimento de 25 a 30 mm, umidade entre 7 e 12% e poder calorífico superior entre 16,92 a 17,64 MJ/kg (EMBRAPA, 2012).

A borra de café é uma biomassa com alto potencial de ser transformada e utilizada como pellets de combustível, uma vez que sua composição tem um alto teor de carbono e liga celulósica que são componentes essenciais para um pellet de qualidade.

O processo de peletização da borra de café seguem as mesmas etapas mostradas na Figura 14, exceto pela moagem que não é necessária devido ao tamanho das partículas da borra que já são menores que 1,0 mm (LACHMAN *et al.*, 2022). A Figura 15 mostra um exemplo de pellets de borra de café.

Figura 15 – Pellets de borra de café



Fonte: Lopez (2020)

Alguns estudos analisaram o potencial energético dos pellets da borra de café chegando a valores semelhantes de poder calorífico superior de 22,36 MJ/kg (COLANTONI, 2021), 22,42 MJ/kg e 21, 08 MJ/kg (NOSEK *et al.*, 2020), mostrando assim a vantagem da borra de café em relação à outras biomassas como a madeira (aproximadamente 17 MJ/kg), uma das mais usadas para fazer pellets e outros como o pellet feito de capim-elefante com valor de 17,72 MJ/kg e o de bagaço de cana-de-açúcar com valor de 18,30 MJ/kg (SILVA, 2016). Além disso, como já visto, a composição da borra de café tem uma grande quantidade de lignina, na qual ajuda no processo de peletização como um aditivo que molda e mantém a estrutura do pellet (ATABANI *et al.*, 2022).

Entretanto, testes de combustão em caldeiras mostraram que os pellets da borra de café são menos resistentes se comparados aos pellets de madeira, resultando em um baixo poder calorífico da caldeira e também uma alta emissão de monóxido de carbono, como mostrou Nosek *et al.* (2020) em testes feitos em uma caldeira de 18 kW e Lachman *et al.* (2022) que testou em uma caldeira de 25 kW. Uma alternativa é usar uma mistura de borra de café com

outros tipos de biomassa, como a serragem de madeira por exemplo, para aumentar a resistência dos pellets e diminuir a emissão de CO (NOSEK *et al.*, 2020) e/ou usar um agente ligante como o amido, por exemplo (COLANTONI, 2021).

Os estudos concluem que os pellets de borra de café têm grande potencial para serem usados como combustível em caldeiras, principalmente quando seus pellets são otimizados para aumentar sua dureza e apesar das altas emissões atmosféricas de CO o uso de filtros de redução em caldeiras domésticas pode mitigar esse problema (COLANTONI, 2021).

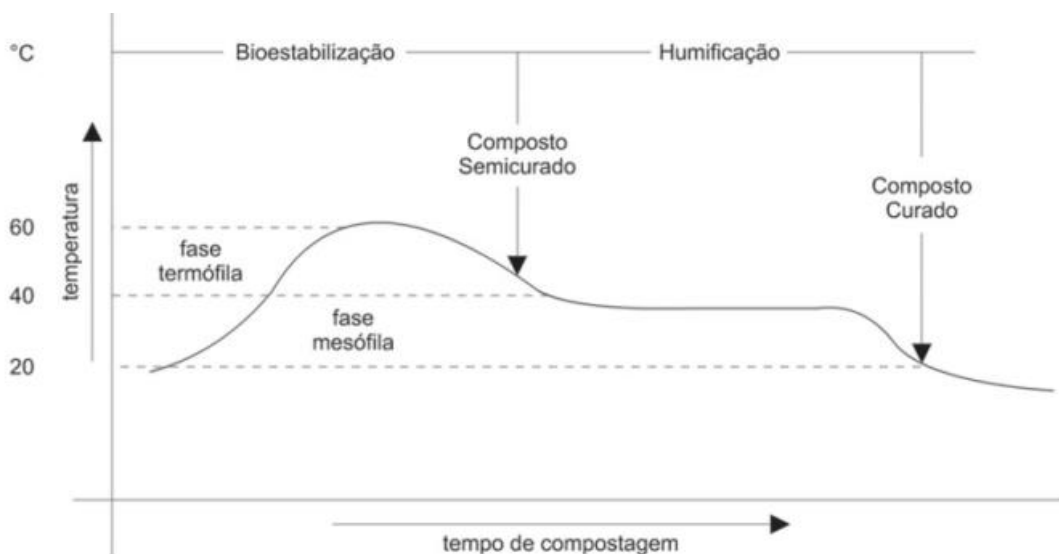
5.2.5 Compostagem

Estudos sobre compostagem da borra de café têm contribuído para a compreensão de como esse resíduo pode ser transformado em um recurso para a agricultura e jardinagem sustentáveis. Esses resíduos são ricos em compostos orgânicos, incluindo ácidos graxos, minerais e polissacarídeos, o que os torna uma fonte potencial de nutrientes para o solo. Porém, a presença de compostos como cafeína, taninos e polifenóis na borra de café pode tornar o resíduo potencialmente tóxico (RIBEIRO, 2019). Além disso, usar a borra de café diretamente no solo sem ser composta pode diminuir a mineralização do nitrogênio da matéria orgânica, reduzindo a disponibilidade deste nutriente para as plantas (SOUZA, 2021).

A compostagem é um processo biológico que utiliza uma mistura de restos de alimentos, folhas, esterco e outros materiais orgânicos para produzir húmus. No final desse processo, obtemos um adubo orgânico de alta qualidade que melhora as propriedades do solo, tornando-o adequado para várias culturas (SOUZA *et al.* 2020). Com tantas variedades de materiais orgânicos e suas combinações, para determinar os melhores compostos para a adubação do solo, a compostagem apresenta parâmetros a ser seguidos de temperatura, pH, umidade, concentração de oxigênio, porosidade e relação carbono nitrogênio (C/N) (AGRIZZI *et al.*, 2022).

O processo de compostagem se inicia com a preparação do material orgânico a ser decomposto, seja totalmente de um único material ou uma combinação deles, sendo o mais comum a combinação de materiais variados. O material orgânico precisa ter uma granulometria fina, por isso pode ser necessário passar pela trituração (EDIA, 2019). Esse material é armazenado em pilhas que precisam ter uma frequência de revolvimento para manter a aeração, uma vez que esse processo é aeróbico. As etapas da compostagem são de decomposição, bioestabilização e humificação, onde as variações de temperaturas são características de cada etapa, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Fases de compostagem e sua relação com a temperatura



Fonte: Souza *et al.* (2020)

Pela Figura 16, observa-se que na fase inicial há um aumento da temperatura, isso se deve ao crescimento dos microrganismos e início da decomposição, logo em seguida tem-se a fase termófila com a ação das bactérias também, gerando calor e vapor de água. A partir da fase mesófila a temperatura começa a diminuir em função da menor atividade microbiana e onde ocorre a degradação de substâncias mais resistentes, por fim há a última fase denominada maturação, onde o composto já está curado e pode ser aplicado ao solo. Esse processo tem uma variação de temperatura entre 40°C e 65 °C (AGRIZZI *et al.*, 2022).

Santos *et al.* (2017) estudaram a compostagem utilizando a borra de café em diferentes proporções em uma mistura contendo palha de trigo e de brotos de *Acacia dealbata* L., as proporções de borra usadas foram de 0 a 40%. Em seu estudo foi demonstrado que a compostagem da borra de café diminuiu sua toxicidade uma vez que houve uma diminuição substancial nos fenólicos e taninos totais, além disso, mostrou a importância da combinação com resíduos lignocelulósicos, uma vez que aumenta a relação C/N.

Oliveira *et al.* (2018) fizeram o experimento em pequena escala utilizando a borra de café e resíduos orgânicos do restaurante de uma instituição de ensino, nas proporções de 20 e 30 % de borra de café. Sua avaliação mostrou que o composto contendo 20% de borra de café tinha um pH próximo a 8, sendo que o adequado é entre 6 e 7,5, enquanto o composto com 30% ficou com um pH 7, além desse parâmetro as duas amostras mostraram pouca diferença nos demais parâmetros e mostraram potencial para serem usadas como fertilizantes orgânicos.

Partindo para uma escala maior, Souza (2021), testou a compostagem da borra de café feita em uma usina de compostagem aplicando em uma pequena área de plantação de milho

com o objetivo de avaliar a substituição de fertilizante NPK pelo adubo de compostagem. Neste experimento a compostagem era feita de 45% de borra de café, 35% de serragem, 15% de restos de poda e 5% de palha de café. Seus resultados mostraram que em questão de germinação e crescimento do milho, o fertilizante NPK ainda tem resultados superiores, mas isso pode ser explicado pela velocidade de liberação de nutrientes para o crescimento da planta, onde os adubos minerais de NPK liberaram os nutrientes mais rápido logo após a sua aplicação devido sua alta solubilidade, já os adubos orgânicos precisam de um tempo para que ocorra a sua mineralização e assim disponibilizem para as plantas todos os nutrientes que possuem. A adubação do composto orgânico produzido de resíduo de borra de café apresentou resultados satisfatórios na nutrição da cultura do milho.

5.2.6 Fungos

Os cogumelos, pertencentes ao reino *Fungi*, são os corpos frutificados dos fungos. Apesar de serem reconhecidos pela sua toxidade, várias espécies são usadas em aplicações farmacológicas, além de serem considerados um alimento especial devido sua composição que apresenta um alto valor nutricional como elevados índices de proteínas, vitaminas, minerais e carboidratos, entre outros (URBEN, 2017).

O cultivo de cogumelos por meio de substratos tem sido uma alternativa crescente ao cultivo tradicional em toras, que costuma ser muito mais demorado e com um rendimento menor. Os substratos mais usados são os resíduos agrícolas e agroindustriais onde sua composição irá depender do tipo de fungo a ser cultivado (MALLER; SILVA; VIEIRA, 2021).

Freitas *et al.* (2018) estudaram o cultivo de cogumelos do gênero *Pleurotus* em substrato orgânico comercial com a incorporação de borra de café. Usando sacos de filtros para cultivar os cogumelos e um substrato composto por 50% de material orgânico comercial e 50% de borra de café esterilizada, a frutificação dos cogumelos ocorreu após 40 dias, o mesmo período de tempo quando usado somente o substrato comercial, mostrando um resultado bem sucedido no cultivo de cogumelos. A Figura 17 mostra um exemplo na evolução de crescimento dos fungos usando sacos plásticos.

Figura 17 – Evolução do crescimento e frutificação de fungos em substrato contendo borra de café



Fonte: Sayner (2019)

O gênero *Pleurotus* apresenta um rápido crescimento miceliano e de frutificação, exigindo pouco controle de ambiente para seu cultivo e não necessita que o substrato sofra compostagem prévia podendo ser cultivado na maioria dos resíduos agrícolas (FAN; SOCCOL; PANDEY, 2000), por isso costuma ser o gênero mais estudado quando se trata de diferentes substratos.

Chai *et al.* (2021) também estudaram o cultivo de cogumelos do gênero *Pleurotus* em substratos com diferentes proporções de 10 a 40% de borra de café, sendo cultivados em sacos plásticos de polietileno esterilizados e com um teor de umidade entre 50 e 70%. Em seu estudo, os resultados mostraram que devido aos compostos fenólicos e cafeína presentes na borra de café, a taxa de frutificação do cogumelo foi suprimida em proporções acima de 30% de borra de café, ao mesmo tempo que os cogumelos também reduziram esses compostos por meio de bioacumulação e biodegradação. Monteiro (2022) também chegou a resultados semelhantes ao cultivar cogumelos do gênero *Pleurotus* em substratos contendo diferentes proporções de borra de café e bagaço de cana. Seus resultados mostraram que ao aumentar a proporção de borra de café, a taxa de crescimento diminuía, porém o substrato pós cultivo com a borra de café possui grande potencial para uso agrônômico no solo, uma vez que o cogumelo mostrou capacidade de degradar diferentes proporções de borra de café, diminuindo seus compostos tóxicos para o solo.

5.2.7 Bioativos

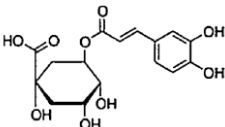
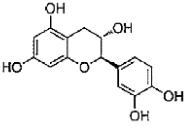
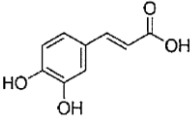
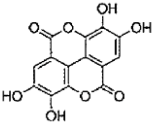
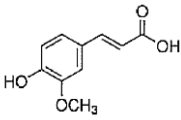
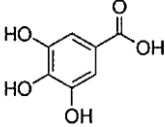
A borra de café apresenta muitos compostos bioativos que oferecem diversos benefícios à saúde com potenciais efeitos biológicos podendo ser usados tanto na indústria alimentícia quanto farmacêutica (BONDAM *et al.*, 2022). As substâncias fenólicas, apesar de tóxicas para

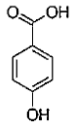
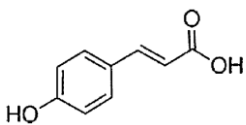
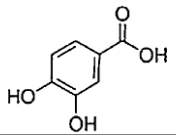
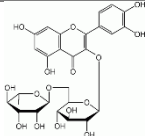
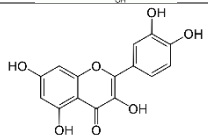
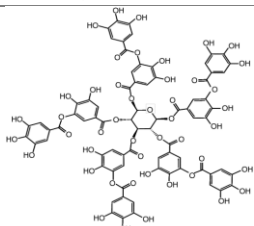
alguns microrganismos, são os bioativos que mais tem sido estudado em como fazer sua extração pois apresentam diversas atividades fisiológicas, como antioxidante, antimicrobiana, antimutagênica, anti-inflamatória e antialérgica, sendo atualmente utilizados nas áreas de biologia, medicina, tecnologia alimentar, entre outras. As suas propriedades antioxidantes podem ser consequência da presença de compostos fenólicos, como os ácidos clorogênicos, e de ácidos não fenólicos, como a cafeína e a trigonelina (FRANCA; OLIVEIRA, 2022; ABRAHÃO *et al.*, 2019).

Para a química, os compostos fenólicos são estruturas formadas de hidroxilas e anéis aromáticos que são encontradas na forma simples ou de polímeros. Podem-se encontrar esses compostos tanto de forma natural ou de forma sintética. Portanto esses compostos fenólicos dividem-se em flavonoides ou não flavonoides (ácidos fenólicos, fenóis simples, cumarinas, taninos, ligninas e tocoferóis). De origem vegetal, esses são originados do metabolismo secundário das plantas, em que se torna essencial para seu crescimento e reprodução (BENTO *et al.*, 2017).

Neste contexto, a Tabela 6 apresenta alguns compostos fenólicos que podem ser extraídos da borra de café.

Tabela 6 - Compostos fenólicos identificados na borra de café.

Composto	Molécula	µgGAE/g	mg/g
Ácido clorogênico		0,3 – 41,3	1,8 – 5,6
Catequina, Epicatequina		0,3	0,3 – 0,6
Ácido cafeico		0,1	0,03 – 0,07
Ácido elágico		nd	0,06 – 0,1
Ácido ferúlico		nd	0,004 – 0,01
Ácido gálico		14,3	1,3 – 2,5

Ácido <i>p</i>-hidróxibenzoico		3,1	nd
Ácido <i>p</i>-cumárico		nd	0,01
Ácido protocatecuico		0,6 – 33,1	nd
Rutina		nd	0,06
Quercetina		nd	0,96 – 1,0
Ácido tânico		0,7	nd

* GAE: equivalentes de ácido gálico

*nd: não determinado

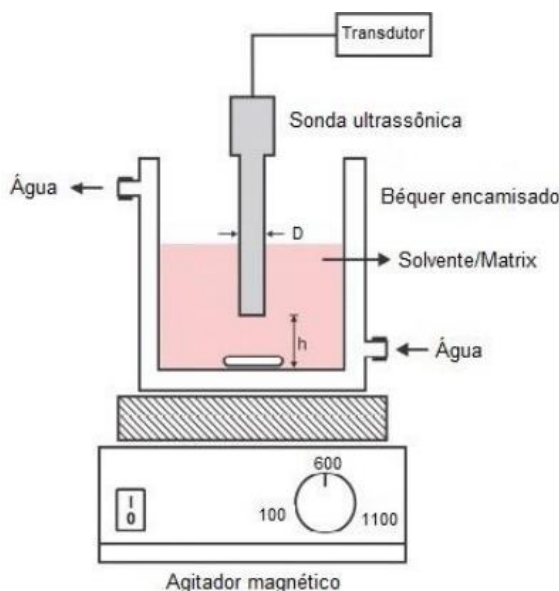
Fonte: Adaptado Kovalcik *et al.* (2018).

Existem várias abordagens disponíveis para extrair os compostos bioativos presentes nos resíduos de café, que variam desde técnicas tradicionais, como agitação ou extração *Soxhlet*, até métodos mais inovadores, como ultrassom, fluido supercrítico, água subcrítica e campo elétrico pulsado (BONDAM *et al.*, 2022).

Solomakou *et al.* (2022) fizeram a extração dos compostos fenólicos da borra de café por meio de diferentes técnicas: extração por agitação com solvente, extração assistida por ultrassom e extração assistida por micro-ondas. Usando a borra de café seca (teor de umidade de 3%), na extração por agitação com solvente a borra foi misturada com etanol em diferentes proporções e mantida sob agitação usando um agitador magnético termostático. Neste tipo de extração o maior rendimento foi de 22,01 mg composto fenólico/ g de borra de café. Na extração assistida por ultrassom o maior rendimento foi de 18,54 mg composto fenólico/ g de borra de café. Neste tipo de extração, a borra de café misturada com o solvente (água e etanol), é submetida a ondas ultrassônicas produzidas por transdutores que ficam em contato com a fase líquida, onde essas ondas produzem uma agitação no líquido promovendo a quebra da parede

celular das células vegetais da borra de café liberando os compostos bioativos (BONDAM *et al.*, 2022). Um exemplo desse sistema pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Exemplo de um sistema de extração assistida por ultrassom



Fonte: Dias (2015)

A extração assistida por micro-ondas é um método de elevação da temperatura da fase líquida (soluto-solvente) por meio de radiação de micro-ondas da superfície interna em direção a externa, onde acaba promovendo a difusão dos compostos fenólicos no solvente (BONDAM *et al.*, 2022). Por meio desse método, Solomakou *et al.* (2022) chegou ao seu maior rendimento de 32,2 mg composto fenólico/ g de borra de café.

Gonçalves *et al.* (2019) usou a extração por agitação usando como solvente água e etanol e borras de cafés de origens diferentes, chegando a rendimentos entre 9 e 29 mg composto fenólico/ g de borra de café, mostrando que a concentração de bioativos pode variar dependendo do tipo de café e o método de preparo.

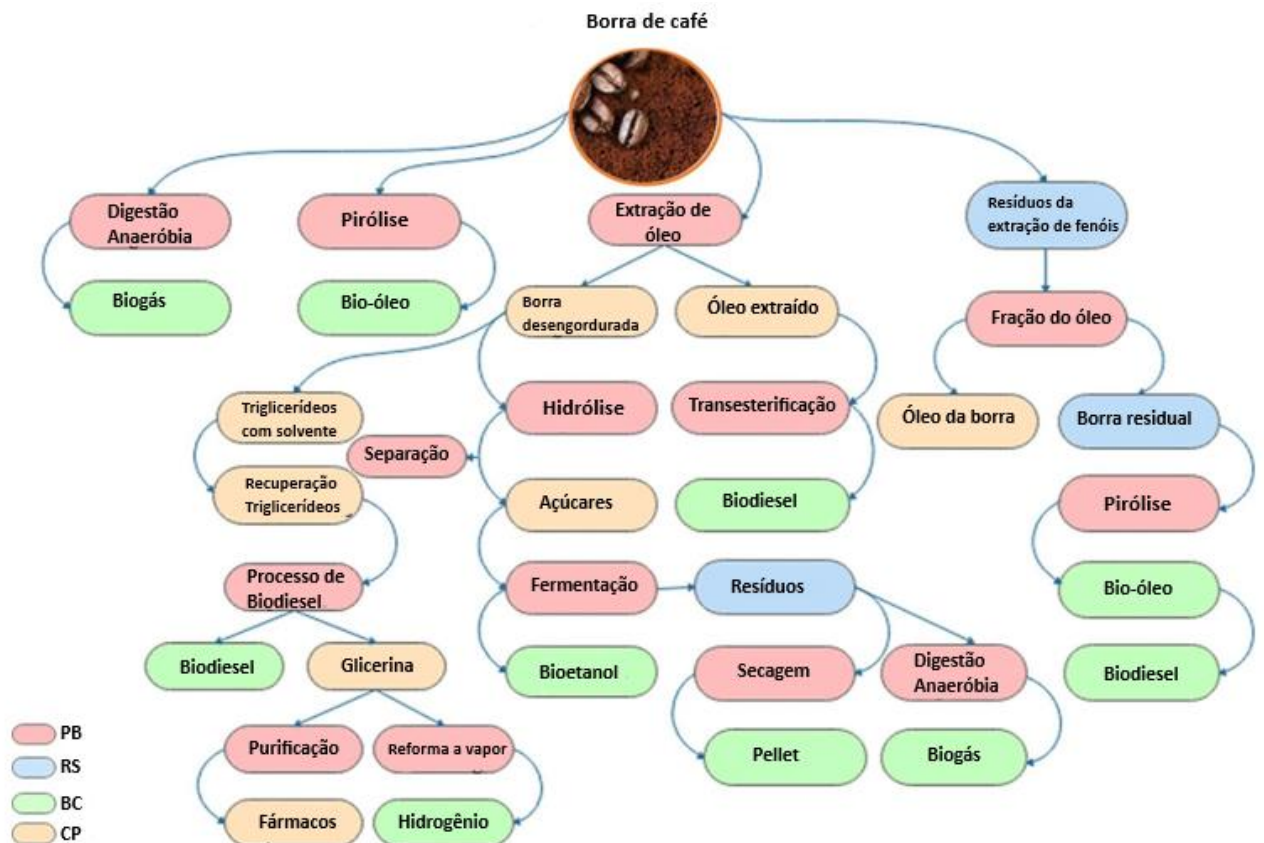
5.2.8 Biorrefinarias

Uma biorrefinaria pode ser entendida como um conjunto de instalações industriais que combinam processos de conversão de biomassa com equipamentos para gerar uma variedade de produtos com pouco desperdício e mínimas emissões de poluentes (JÚNIOR, 2008).

Como já foi mostrado, a borra de café pode ser transformada em vários produtos de valor agregado que podem ser usados em diversos setores. Pensando nas técnicas de conversão, variedades de produtos e aspectos econômicos e ambientais, estudos mais recentes estão

buscando a valorização da borra de café por meio de biorrefinarias. A Figura 19 mostra várias rotas integradas de biorrefinaria para a produção de diferentes bioprodutos a partir da borra de café.

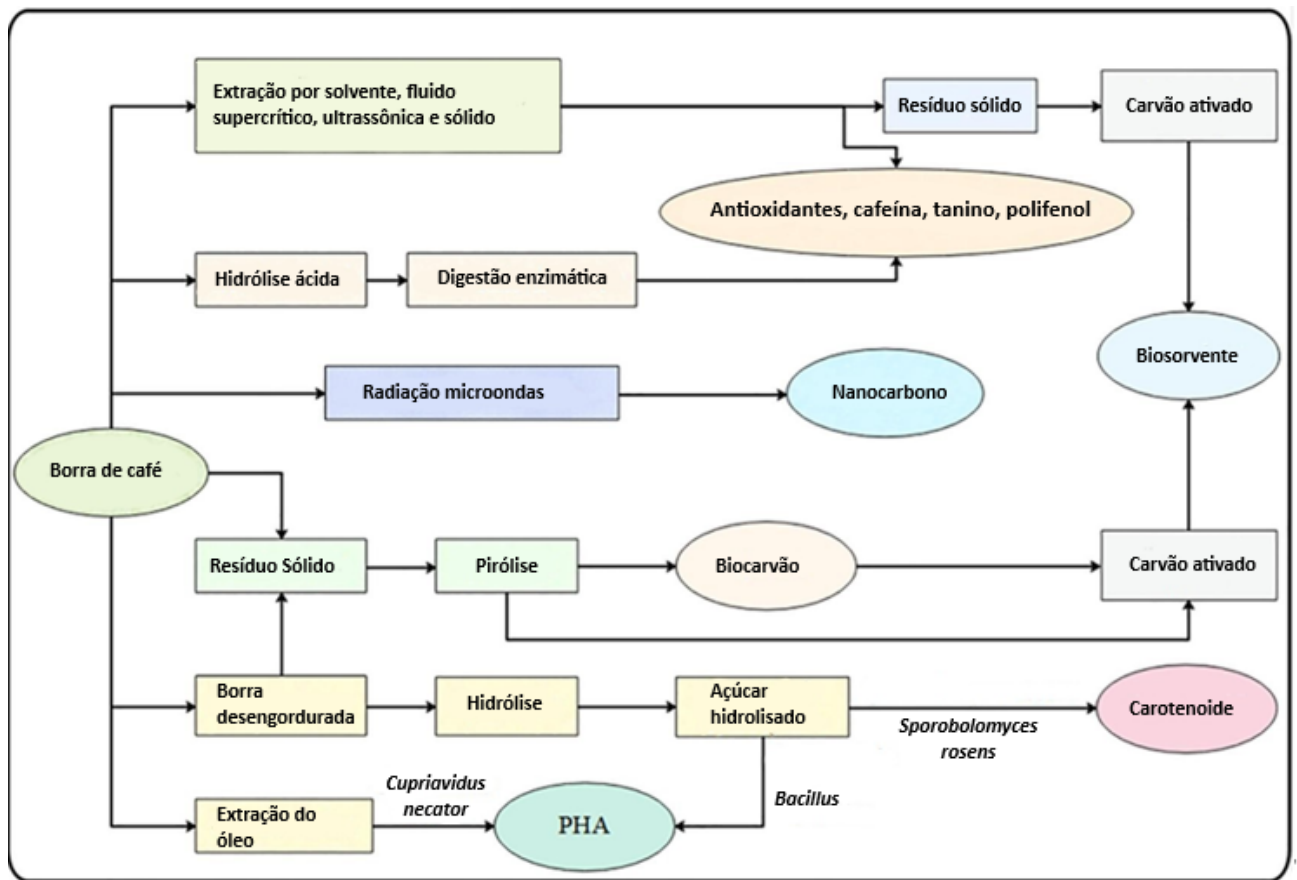
Figura 19 - Rotas integradas de produção de diferentes bioprodutos a partir da borra de café (PB- Processos da Biorrefinaria; RS - Resíduos; BC- Biocombustível; CP- Co-productos).



Fonte: Adaptado de BANU *et al.*, (2020)

A Figura 20 representa várias rotas integradas de biorrefinaria para a recuperação de produtos como: biopolímero, cafeína, bioissorventes, *biochar*, antioxidantes, entre outros, a partir das frações da borra de café.

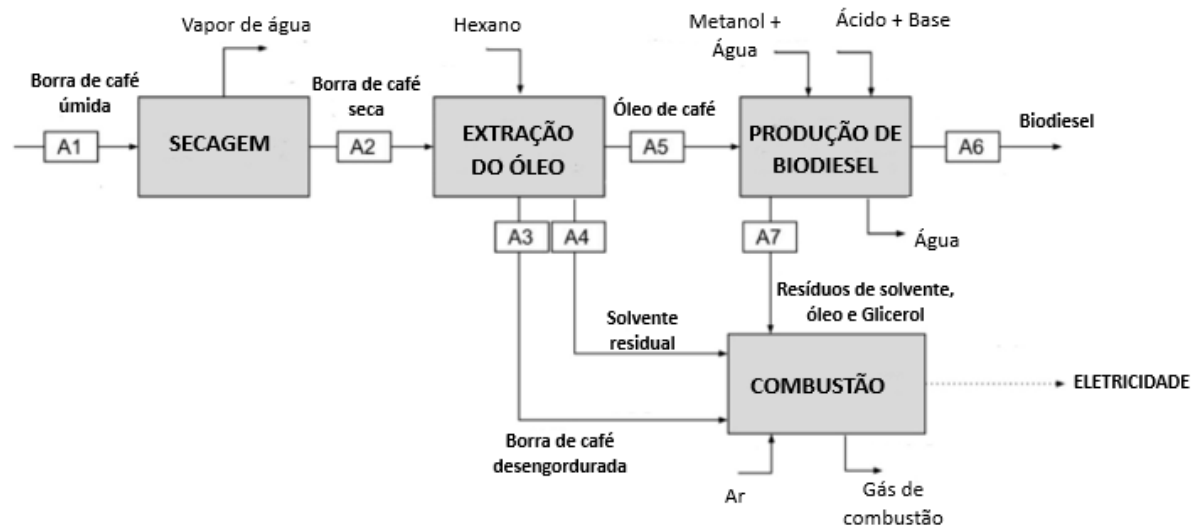
Figura 20 - Biorrefinaria da borra de café visando produzir bioadsorventes, carotenoides, antioxidantes, nanocarvão e PHA (polihidroxiácidos)



Fonte: Adaptado de BANU *et al.*, (2020)

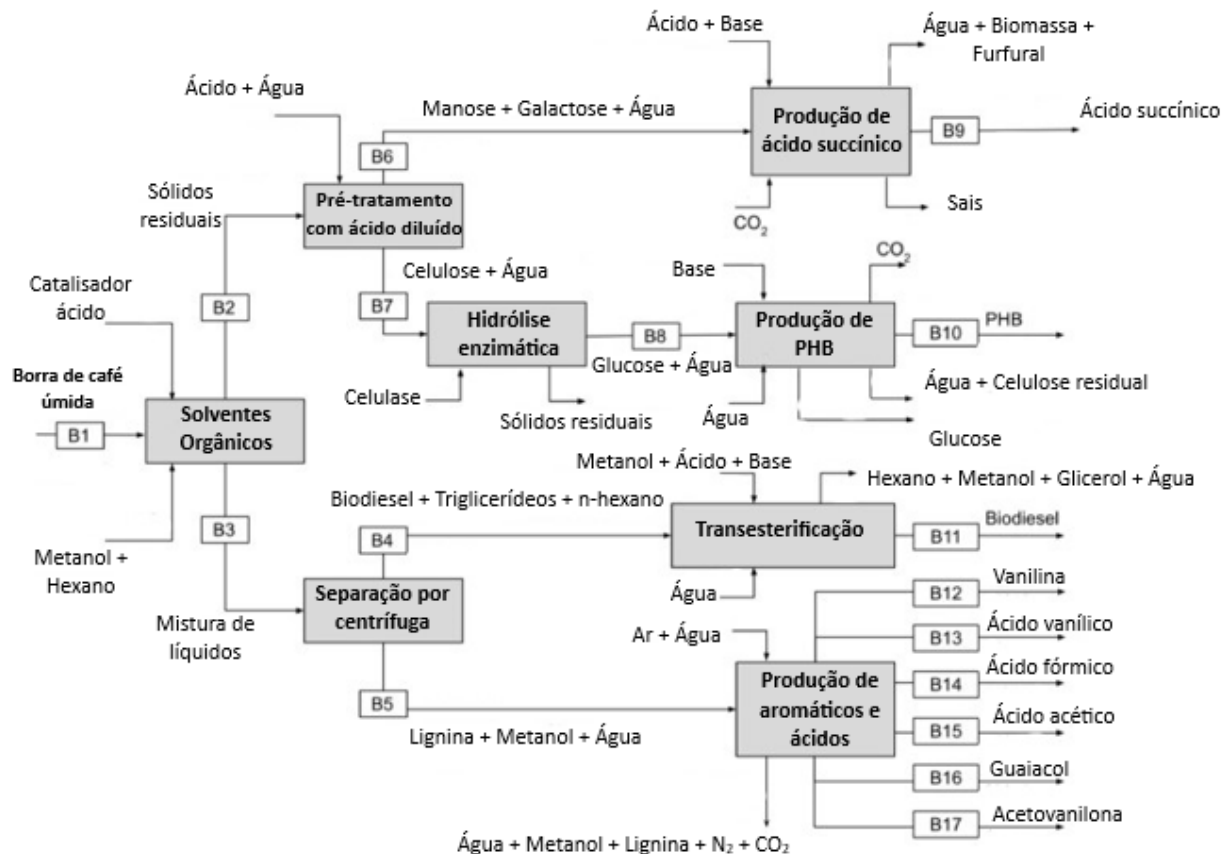
Yeoh e Siew (2022) propôs duas configurações de projetos de biorrefinaria abordando a conversão da borra de café em biodiesel e eletricidade em uma configuração (Figura 21) e biodiesel e produtos químicos de alto valor na outra configuração (Figura 22), além de analisar diferentes cenários econômicos. Neste estudo, foi concluído que o melhor cenário seria uma biorrefinaria localizada no local de fornecimento da borra de café e com produção em larga escala.

Figura 21 – Configuração de uma biorrefinaria de conversão da borra de café para produção de biodiesel e eletricidade



Fonte: Adaptado de Yeoh e Siew (2022)

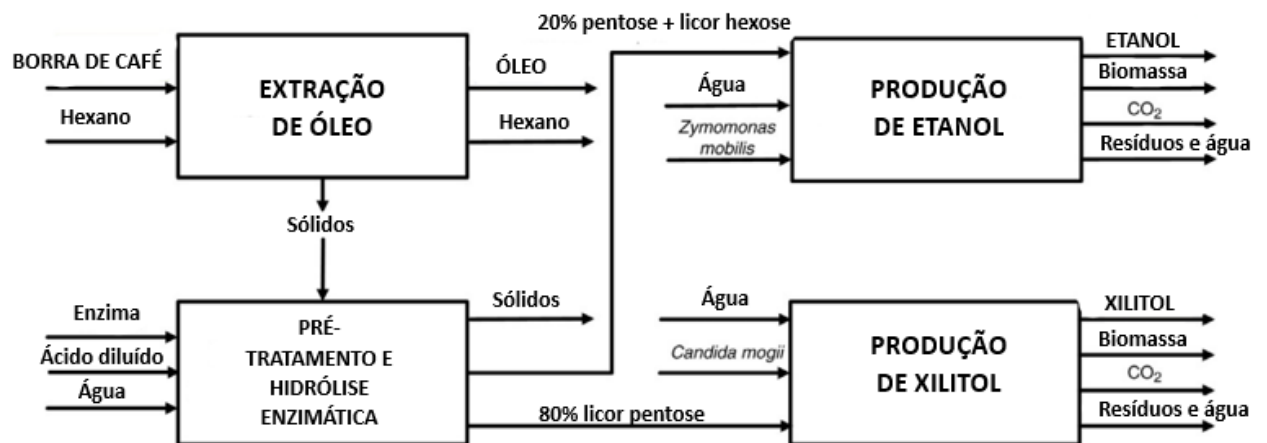
Figura 22 – Configuração de uma biorrefinaria de conversão da borra de café para produção de biodiesel e produtos químicos de alto valor agregado



Fonte: Adaptado de Yeoh e Siew (2022)

Marulanda *et al.*, (2017) propôs uma biorrefinaria de borra de café para produção de óleo, etanol e xilitol, sendo a extração do óleo o primeiro processo e os sólidos resultante deste processo seria usado para produção de etanol e xilitol por meio de hidrólise e fermentação do material lignocelulósico, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Biorrefinaria de borra de café para produção de óleo, etanol e xilitol



Fonte: Adaptado de Marulanda *et al.*, (2017)

Neste estudo de caso, foi concluído que a biorrefinaria teria os custos de produção elevados, resultando em margens econômicas negativas e inviabilidade, porém, a possibilidade de viabilidade surge ao considerar escalas maiores de produção, onde começam a ser viáveis em comparação a processamentos individuais da borra de café.

Massaya *et al.*, (2021), simulou uma biorrefinaria para gerar a partir da borra de café um extrato bioativo, um isolado proteico e um combustível sólido. Neste modelo, foi usado extração com água subcrítica para obter os compostos bioativos, os resíduos dessa extração são usados para extrair a fração proteica e o sólido residual desta etapa é usado para produzir o combustível sólido por meio da carbonização hidrotérmica, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Biorrefinaria de borra de café para produção de extrato bioativo, proteico e combustível sólido



Fonte: Adaptado de Massaya *et al.*, (2021)

Neste cenário foi mostrado que a parte de extração do bioativo estava impactando negativamente a viabilidade econômica da biorrefinaria, uma vez que são necessários mais processos para preservar a integridade deste bioativo e seu rendimento é baixo em relação a complexidade de seu fluxo de obtenção, além disso, ao omitir o fluxo bioativo o rendimento da fração proteica e combustível sólido aumentaram. Sendo assim, este estudo concluiu que limitar a produção da biorrefinaria de borra de café a produtos de médio e baixo valores agregados pode aumentar a viabilidade comercial por meio da redução dos custos operacionais.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Com base nas pesquisas abordadas no presente trabalho, podemos ter algumas perspectivas referente ao futuro da gestão e reutilização da borra de café. A principal perspectiva envolve a implementação prática dessas alternativas em uma escala comercial. Empresas podem considerar o investimento em processos de produção de biocombustíveis, biodiesel, biogás, pellets e outros produtos derivados da borra de café, como foi mostrado com algumas empresas que já fazem o processamento da borra de café, mas ainda são poucas. Além de reduzir significativamente o desperdício, isso abriria novas oportunidades de negócios, especialmente à medida que a demanda por soluções ambientalmente sustentáveis continua a crescer.

A pesquisa e o desenvolvimento nesse campo são outra área de grande potencial. À medida que a tecnologia avança, existem oportunidades contínuas para otimizar processos, melhorar a qualidade dos produtos resultantes e até mesmo descobrir novas aplicações para a borra de café.

A sustentabilidade ambiental é uma tendência global crescente, e o interesse em soluções de tratamento de resíduos, como a borra de café, provavelmente continuará a aumentar. Os governos podem desempenhar um papel fundamental na promoção e investimento em práticas de gestão de resíduos mais sustentáveis, como um meio de coleta eficiente da borra de café que é um desafio a ser abordado. Empresas locais também podem trabalhar em conjunto para desenvolver sistemas de coleta e logística que facilitem a separação da borra de café para reciclagem em uma variedade de ambientes, incluindo cafeterias, escritórios, residências e restaurantes.

A logística de coleta da borra de café é um dos gargalos que precisa ser solucionado para que tecnologias de processamento da borra de café sejam viáveis economicamente. Assim, a logística precisa ser eficiente para garantir que a borra de café seja recolhida de forma sustentável e que contribua para a economia circular. Para isto, é necessário estabelecer parcerias com cafeterias, restaurantes e outras empresas que geram borra de café em grandes quantidades, implementar um sistema regular de coleta da borra de café, que pode ser diário ou semanal, dependendo da quantidade de resíduos produzidos, utilizar veículos adequados para o transporte da borra de café dos locais de coleta até o local de processamento, processar a borra de café coletada em produtos úteis e finalmente, converter a borra de café em novos produtos, como compostos, biomassa, entre outros, que permitam dar uma valor agregado alto e como consequência garantir a viabilidade do processo.

A integração das aplicações da borra de café em um sistema de biorrefinaria tem grande potencial se estudado alternativas mais tecnológicas para serem usadas em larga escala. Essas perspectivas futuras destacam o potencial da borra de café como um recurso importante na promoção da sustentabilidade ambiental e econômica. Com contínuas pesquisas e desenvolvimento, a borra de café pode desempenhar um papel importante na economia circular e na gestão de resíduos, gerando benefícios significativos para a sociedade e o meio ambiente.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma revisão abrangente sobre as alternativas de destinação da borra de café, um resíduo abundante e importante proveniente da produção de café. Foi abordado várias opções de valorização desse resíduo, incluindo a produção de bio-óleo, biodiesel, biogás, pellets, compostagem, produção de fungos e de bioativos que podem ser usados na indústria de alimentos e cosméticos.

Ficou evidente ao longo deste estudo que a borra de café possui grande potencial para ser transformada em produtos de valor agregado, contribuindo para a redução do desperdício

de resíduos e para a promoção de práticas sustentáveis em diversas áreas. As pesquisas e experimentos revisados indicaram que a borra de café pode ser eficazmente convertida em bio-óleo, biodiesel, biogás e pellets de alta qualidade, apresentando valores de poder calorífico comparáveis ou superiores a outros materiais de biomassa. Além disso, a compostagem da borra de café se mostrou uma alternativa viável para transformar esse resíduo em um fertilizante orgânico útil para o cultivo de plantas.

Cada uma dessas alternativas tem suas vantagens e desafios específicos. Por exemplo, a produção de bio-óleo e biodiesel a partir da borra de café oferece uma abordagem sustentável para a produção de combustíveis renováveis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. A geração de biogás a partir da borra de café mostra que esse resíduo pode ser uma fonte valiosa de energia, contribuindo para a diversificação das fontes de energia renovável. Além disso, a produção de pellets a partir da borra de café apresentou um alto potencial energético, embora a resistência desses pellets seja um desafio a ser superado. A compostagem da borra de café, quando combinada com outros materiais orgânicos, pode gerar fertilizantes orgânicos ricos em nutrientes que beneficiam o solo e as plantas.

Sendo assim, este estudo destaca a importância de explorar essas alternativas para a destinação da borra de café, visando à redução do desperdício de resíduos, ao desenvolvimento de práticas sustentáveis e à promoção de fontes de energia renovável. Com o aumento da busca por soluções mais sustentáveis, a valorização da borra de café pode se tornar uma prática comum em diversos setores, contribuindo para um futuro mais sustentável e ecologicamente responsável.

REFERÊNCIAS

- ABIC. Associação Brasileira da Indústria do Café. **Origem do Café**. 2021. Disponível em: <https://www.abic.com.br/tudo-de-cafe/origem-do-cafe/>. Acesso em: 5 mar. 2022.
- ABIC. Associação Brasileira da Indústria do Café. **Indicadores Da Indústria De Café | 2022**. 2023. Disponível em: <https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2022/>. Acesso em: 20 set. 2023.
- ABRAHÃO, F.R.; ROCHA, L.C.R.; SANTOS, T.A.; CARMO, E.L.; PEREIRA, L.A.S.; BORGES, S.V.; PEREIRA, R.G.F.A.; BOTREL, D.A. **Microencapsulation Of Bioactive Compounds From Espresso Spent Coffee By Spray Drying**. LWT vol 103, 116-124. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.061>
- AGRIZZI, M. P.; BERILLI, S. S.; VETTORAZZI, J. C. F.; HENRIQUE, E. P.; PIROVANI, C. H. D.; LACCHINE, P. S. **Manual Prático De Pequenas Compostagens**. 2022. Edifes Acadêmico, 17 p, Vitória. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/3169/PRODUTO%20T%C3%89CNOL%C3%93GICO_FINAL...pdf?sequence=6&isAllowed=y. Acesso em 11 out. 2023.
- ALMALLAHI, M. N.; ASAAD, S. M.; MENESES, L. R.; INAYAT, A.; SAID, Z.; ALAYI, R.; ELGENDI, M. **Producing Bio-Oil From Spent Coffee Grounds: A Case Study Utilizing Fast Pyrolysis In A Fluidized Bed Reactor**. 2023. Electronic Journal. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4329797>
- ATABANI, A.E., MAHMOUD, E., ASLAM, M. et al. **Emerging Potential Of Spent Coffee Ground Valorization For Fuel Pellet Production in a Biorefinery**. Environment Development Sustainability Vol 25, 7585–7623 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02361-z>
- BALLESTEROS, L.F., TEIXEIRA, J.A.; MUSSATTO, S.I. **Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin**. Food Bioprocess Technol 7, 3493–3503 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>
- BANU, J.R.; KAVITHA, S.; KANNAH, R.Y.; KUMAR, M.D.; PREETHI; ATABANI, A.E.; KUMAR, G. **Biorefinery Of Spent Coffee Grounds Waste: Viable Pathway Towards Circular Bioeconomy**. Bioresource Technology vol 302. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122821>
- BARROS, T.D. **Biogás**. 2021. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas>. Acesso em jun. 2023
- BATISTA J. R. **Pirólise da Borra de Café: Cinética Química e Operação em Leito Fixo**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2017.
- BATTISTA, F.; ZULIANI, L.; RIZZIOLI, F.; FUSCO, S.; BOLZONELLA, D. **Biodiesel, Biogas And Fermentable Sugars Production From Spent Coffee Grounds: A Cascade Biorefinery Approach**. Bioresource Technology vol 342 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125952>

BESTPRESSO. **Innovations In Single-Serve Coffee Manufacturing Has Allowed Us To Produce An Aromatic Variety Of Flavors Cup After Cup.** 2023. Disponível em: <https://bestpresso.com/pages/recycling>. Acesso em: 27 out. 2023.

BIOVERA. **O Que É E Como Funciona Um Rotaevaporador.** 2019. Disponível em: <https://www.biovera.com.br/o-que-e-e-como-funciona-um-rotaevaporador/>. Acesso em mar. 2023

BRASIL, Ministério Do Desenvolvimento Agrário. **Programa Nacional do Biodiesel: Inclusão social e desenvolvimento territorial.** 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/mda/biodiesel/arquivos/cartilha-do-programa-nacional-de-producao-e-uso-de-biodiesel-pnpb.pdf>. Acesso em: jun. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares.** Brasília: MMA, 2022. 209 p. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em: 15 set. 2022.

BRIDGWATER, A.V. **Renewable Fuels And Chemicals By Thermal Processing Of Biomass.** Chemical Engineering Journal. Volume 91, Issue 2-3, 2003, Pages 87-102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)

BOMFIM, A.S.C.d.; OLIVEIRA, D.M.; WALLING, E.; BABIN, A.; HERSANT, G.; VANECKHAUTE, C.; DUMONT, M.J.; RODRIGUE, D. **Spent Coffee Grounds Characterization and Reuse in Composting and Soil Amendment.** Waste 2023, 1, 2-20. <https://doi.org/10.3390/waste1010002>

BONDAM, A. F.; SILVEIRA, D. D.; SANTOS, J. P.; HOFFMANN, J. F. **Phenolic Compounds From Coffee By-Products: Extraction And Application In The Food And Pharmaceutical Industries.** 2022. Trends in Food Science & Technology vol 123, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.013>

CAFECULTURA. **A História Do Café E Suas Lendas.** 2016. Disponível em: <https://www.cafeculturabrasil.com/a-historia-do-cafe-e-suas-lendas/>. Acesso em: 5 mar. 2022.

CALDEIRA, D.C.A. **Valorização Da Borra De Café: Otimização Da Produção De Biodiesel Por Catálise Enzimática.** 2015. Tese de Doutorado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal).

CHAI, W.Y.; KRISHNAN, U. G.; SABARATNAM, V.; TAN, J. B. L. **Assessment Of Coffee Waste In Formulation Of Substrate For Oyster Mushrooms *Pleurotus Pulmonarius* And *Pleurotus Floridanus*.** 2021. Future Foods 4. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100075>

CHIES, V. **Bio-Óleo: Alternativa Para Extrair Combustíveis Líquidos E Químicos Renováveis Do Eucalipto.** Embrapa Agroenergia (Cnpae), v. 4, n. 9, 01 jul. 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/145010/1/AgroenergiaEmRevista-ed09-16-17-2015.pdf>. Acesso em: 25 set. 2023.

COLANTONI, A., PARIS, E., BIANCHINI, L. et al. **Spent Coffee Ground Characterization, Pelletization Test And Emissions Assessment In The Combustion Process.** Sci Rep 11, 5119 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84772-y>

COMUNICAFÉ. **How You Can Reuse Coffee Grounds In The Garden, For Your Skin Care And Cooking.** 2021. Disponível em: <https://www.comunicaffe.com/how-to-reuse-coffee-grounds-in-the-garden-for-your-skin-care-and-cooking/>. Acesso em 13 dez. 2023

DALVI, Leandro Pin. **Qualidade Dos Cafés Verde-Cana E Cereja Preparados Por Via Úmida.** 2011. 58 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, MG, 2011.

DA SILVA, L. C. **Café – Fruto, Grão E Bebida.** Espírito Santo: 2012. 12 p. Disponível em: http://www.agais.com/manuscript/cafe0112_cafe_fruto_grao_bebida.pdf. Acesso em: 10 ago. 2022.

DIAS, A. L. B. **Extração Supercrítica De Compostos Bioativos Da Pimenta Dedo De Moça (Capsicum Baccatum L. Var. Pendulum) Assistida Por Ultrassom.** 2015. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1626599>. Acesso em: 2 nov. 2023.

DURÁN, C. A. A. et al. **Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida.** Revista Virtual de Química, Rio de Janeiro, v. 9, ed. 1, 2016. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/ClaudiaNoPrelo.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ECOBÉAN. **Coffee Waste Reinvented.** 2023. Disponível em: <https://ecobean.pl/>. Acesso em: 13 nov. 2023.

ECONODATA. **Empresas de Torrefação e Moagem de Café no Brasil.** 2023. Disponível em: <https://www.econodata.com.br/empresas/todo-brasil/torrefacao-e-moagem-de-cafe-c-1081302>. Acesso em: 12 set. 2023.

EFTHYMIPOULOS, I., HELLIER, P., LADOMMATOS, N.; KAY, A.; LAMPTEY, B. M. **Effect Of Solvent Extraction Parameters On The Recovery Of Oil From Spent Coffee Grounds For Biofuel Production.** Waste Biomass vol 10, 253–264 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0061-4>

EMBRAPA. **Briquetagem e Peletização de Resíduos Agrícolas e Florestais.** 2012. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/932713/1/FOLDERBriquetagem2012.pdf>. Acesso 03 set. 2023

EMBRAPA. **Evolução Da Cafeicultura Brasileira Nas Últimas Duas Décadas.** 2023. Disponível em: http://www.consorcioesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/2022/dezembro/Consortio-Embrapa-Cafe-Evolucao_18_1_23.pdf. Acesso em: 20 set. 2023.

ENVAR. **Coffee Grounds Recycling.** 2023. Disponível em: <https://www.envar.co.uk/coffee-grounds-recycling/>. Acesso em: 27 out. 2023.

FERRAZ, A. **Cultura Do Café.** Instituto Formação. 2013-2. Disponível em: <http://www.ifcursos.com.br/sistema/admin/arquivos/15-09-28-apostilaculturadocafe.pdf>.

Acesso em: 15 mar. 2022

FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. **Potential Uses of Spent Coffee Grounds in the Food Industry**. 2022. Foods vol 11. <https://doi.org/10.3390/foods11142064>

FREITAS, A. C., ANTUNES, M. B., RODRIGUES, D., SOUSA, S., AMORIM, M., BARROSO, M. F., CARVALHO, A.; FERRADOR, S. M.; GOMES, A. M. **Use Of Coffee By-Products For The Cultivation Of Pleurotus Citrinopileatus And Pleurotus Salmoneo-Stramineus And Its Impact On Biological Properties Of Extracts Thereof**. 2018. International Journal of Food Science & Technology, 53(8), 1914-1924.

FOOD S. **Soxhlet Extraction**. 2020. Disponível em: <https://www.foodscience-avenue.com/2020/08/soxhlet-extraction.html>. Acesso em: mar. 2023

GARCIA, D. P. **Caracterização Química, Física e Térmica de Pellets de Madeira Produzidos no Brasil**. 2010. 101 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

GIROTTI, F., LAVAGNOLO, M.C. & PIVATO, A. **Spent Coffee Grounds Alkaline Pre-treatment as Biorefinery Option to Enhance their Anaerobic Digestion Yield**. Waste Biomass V. 9, 2565–2570 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0033-8>

GONÇALVES., M. R.; MEJIA, E. G.; CONRADO, N. R.; GONZALEZ, M. E. L.; MADRID, Y. **Extraction, Identification And Quantification Of Polyphenols From Spent Coffee Grounds By Chromatographic Methods And Chemometric Analyses**. 2019. Waste Management vol 96, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.009>

HERMANN, K. A. C. et al. **Avaliação do Uso da Borra de Café para Utilização em Produtos Cosméticos**. Revista Virtual de Química, Santa Catarina, v. 11, ed. 6, 2019. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/ClaudiaNoPrelo.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

HOHMANN, S. **Borra De Café: Como A Biotecnologia Pode Aproveitar Esse Resíduo**. Revista Blog do Profissão Biotec, v.8, 2021. Disponível em: <https://profissaobiotec.com.br/borra-de-cafe-como-biotecnologia-pode-aproveitar-esse-residuo/>. Acesso em: 07 set. 2022

ICO, International Coffee Organization (org.). **A História Do Café**. Disponível em: https://www.ico.org/pt/coffee_storyp.asp. Acesso em: 7 mar. 2022.

ICO, International Coffee Organization (org.). **Aspectos Botânicos**. Disponível em: https://www.https://www.ico.org/pt/botanical_p.asp. Acesso em: 4 abr. 2022.

ICO, International Coffee Organization (org.). **Processamento No Campo**. 2015 Disponível em: https://www.ico.org/pt/field_processing_p.asp. Acesso em: 10 ago. 2022.

JAM Projetos Especiais. **Peletização de Biomassa**. 2022. Disponível em: <https://www.jamprojetosespeciais.com.br/post/peletiza%C3%A7%C3%A3o-de-biomassa>. Acesso em: 03 set. 2023.

JOPPERT, C. **Aspectos Tecnológicos do Biogás e Biometano**. 2020. Disponível em: <https://www.figener.com.br/cases/2020/11/16/aspectos-tecnologicos-do-biogas-e-biometano/>. Acesso em ago. 2023

KAFFE BUENO. **Kaffe Bueno Inaugurates The World's First Coffee Biorefinery**. 2023. Disponível em: <https://www.kaffebueno.com/post/kaffe-bueno-inaugurates-the-world-s-first-coffee-biorefinery>. Acesso em: 26 out. 2023.

KARLSSON, T., KONRAD, O., LUMI, M., SCHMEIER, N. P., MARDER, M., CASARIL, C. E., PEDROSO, A. G. **Manual Básico De Biogás**. Lajeado: Editora da Univates.

TEIXEIRA, R. A. **Digestão Anaeróbica e Potencial de Geração de Biogás a Partir da Borra de Café**. 2019. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias Sustentáveis, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

KLUSENER, A. S., ZABOT, G. L., TRES, M. V., CUNHA, E. S. L., MORAIS, J. R., SILVA, J. F., SOUZA, V. L. (2022). **Borra De Café Como Biomassa Para Produção Energética**. Revista Interdisciplinar De Pesquisa Em Engenharia, 8(1), 1–12. Recuperado de <https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/38167>

KOVALCIK, A.; OBRUCA, S.; MAROVA, I. **Valorization Of Spent Coffee Grounds: A Review**. Food and Bioproducts Processing vol 110, 104-119. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.003>

KUSUMA, J.; INDARTONO, Y. S.; MUJAHIDIN, D. **Biodiesel And Activated Carbon From Arabica Spent Coffee Grounds**. MethodsX vol 10 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102185>

LACHMAN, J.; LISY, M.; BALAS, M.; MATUS, M.; LISA, H.; MILCAK, P. **Spent Coffee Grounds and Wood Co-Firing: Fuel Preparation, Properties, Thermal Decomposition, and Emissions**. Renewable Energy vol 193, 464-474 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.003>

LIMA, N. F. **Pirólise De Biomassa Lignocelulósica Utilizando Diferentes Catalisadores Para Produção De Bio-Óleo**. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

LOPEZ, B. M. **Pellets De Biomasa: La Idea De Negocio Que Involucra Posos De Café**. 2020. Disponível em: <https://incapto.com/blog/pellets-de-biomasa-la-idea-de-negocio-que-involucra-posos-de-cafe/>. Acesso em 13 dez. 2023

LY, H. V.; LEE, B.; SIM, J. W.; TRAN, Q. K.; KIM, S. S.; KIM, J.; BRIGLJEVIC, B.; HWANG, H. T.; LIM, H. **Catalytic Pyrolysis Of Spent Coffee Waste For Upgrading Sustainable Bio-Oil In A Bubbling Fluidized-Bed Reactor: Experimental And Techno-Economic Analysis**. 2022 Chemical Engineering Journal, 427, 130956. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130956>

MAHMOUD, E., ATABANI, A.E., BADRUDDIN I.A. **Valorization Of Spent Coffee Grounds For Biogas Production: A Circular Bioeconomy Approach For A Biorefinery**. Fuel. Volume 328, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125296>.

MALLER, A. N.; SILVA, T. S.; VIEIRA, W. W. **Desenvolvimento De Processo Para A Produção De Cogumelos Comestíveis A Partir Do Bagaço De Malte**. 2021. TCC - Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Positivo, Curitiba, 2021.

MAPA. **Café no Brasil e Ementário do Café**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>. Acesso em: 10 set. 2023.

MARKETEER. **Nam Já Recolheu 200 Toneladas De Borrás De Café Delta Para Produzir Cogumelos**. 2023. Disponível em: <https://marketeer.sapo.pt/nam-ja-recolheu-200-toneladas-de-borras-de-cafe-delta-para-produzir-cogumelos/>. Acesso em: 27 out. 2023.

MARULANDA, V. A.; PEREZ, Y. C.; ALZATE, C. A. C. **Chapter 3 - The biorefinery concept for the industrial valorization of coffee processing by-products**. 2017. Handbook of Coffee Processing By-Products, 63-92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00003-7>

MASSAYA, J., CHAN, K.H., MILLS-LAMPTEY, B.; CHUCK, C.J. **Developing A Biorefinery From Spent Coffee Grounds Using Subcritical Water And Hydrothermal Carbonisation**. Biomass Conversion and Biorefinery vol 13, 1279–1295 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01231-w>

MELO, A. C. C. **Caracterização E Fracionamento Do Bio-Óleo Obtido Pela Pirólise Rápida Do Bagaço De Cana-De-Açúcar**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

MONTEIRO, R. E. P. **Fermentação Em Estado Sólido Da Borra De Café Para O Cultivo De Shimeji-Preto (Pleurotus Ostreatus Jacq.)** 2022. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2022.

MORDOR INTELLIGENCE. **Participação No Mercado De Café, Tamanho, Tendências E Análise Do Setor**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/coffee-market>. Acesso em: 25 jul. 2023.

MOURA, C. L. **Extração E Caracterização Da Composição Lipídica Da Borra De Café E O Estudo Do Potencial Aproveitamento Deste Resíduo**. 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

MUANGRAT, R.; PONGSIRIKUL, I. **Recovery Of Spent Coffee Grounds Oil Using Supercritical CO₂: Extraction Optimisation And Physicochemical Properties Of Oil**. Cyta Journal of Food vol 17, 334–346 (2019). <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1580771>

MUSSATTO, S. I.; CARNEIRO, L. M.; SILVA, J. P. A.; ROBERTO, I. C.; TEIXEIRA, J. A. **A Study on Chemical Constituents and Sugars Extraction from Spent Coffee Grounds**. Carbohydrate Polymers, Volume 83, Issue 2, 2011, Pages 368-374. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.07.063>.

NGUYEN, H. C.; NGUYEN, M. L.; WANG, F. M.; JUAN, H. Y.; SU, C. H. **Biodiesel Production By Direct Transesterification Of Wet Spent Coffee Grounds Using Switchable Solvent As A Catalyst And Solvent**. Bioresource Technology vol 296 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122334>

NOSEK, R.; TUN, M.M.; JUCHELKOVA, D. **Energy Utilization of Spent Coffee Grounds in the Form of Pellets**. *Energies* 2020, Vol 13, 1235. <https://doi.org/10.3390/en13051235>

OLIVEIRA, M. M.; BARRETO, G. A. R.; KORRES A. M. N.; RIBEIRO, S. S.; BRINGHENTI, J. R. **Compostagem Em Pequena Escala Utilizando Borra De Café Como Alternativa Para Valorização De Resíduos Sólidos Orgânicos Em Instituições De Ensino Superior**. *Revista Científica e-Locução*, v. 1, n. 17, p. 26-26, 2020.

PAIVA, L. **Tipos de Torra de Café: As 3 Opções Disponíveis no Mercado**. 2022. Disponível em: <https://reviewcafe.com.br/dicas-e-receitas/tipos-de-torra-de-cafe/>. Acesso em: 5 ago. 2022.

PANKRATYEVA, A. **Top 5 Most Traded Commodities In The World**. 2018. Disponível em: <https://capital.com/top-5-most-traded-commodities-in-the-world>. Acesso em: 17 ago. 2022.

PRIMAZ, C. T.; SCHENA, T.; LAZZARI, E.; CARAMÃO, E. B.; JACQUES, R. A. **Influence Of The Temperature In The Yield And Composition Of The Bio-Oil From The Pyrolysis Of Spent Coffee Grounds: Characterization By Comprehensive Two Dimensional Gas Chromatography**. 2018 *Fuel*, 232, 572-580. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.097>

PUELLO, S. J.; MENDEZ, G. L.; LOMBANA, J.; MARRUGO, D. D.; TURIZO, R. C. (2018). **Physicochemical Characterization of Spent Coffee Ground (Coffea Arabica L) and its Antioxidant Evaluation**. *Advance Journal of Food Science and Technology*. <http://dx.doi.org/10.19026/ajfst.16.5958>

PUJOL, D., LIU, C.; GOMINHO, J.; OLIVELLA, M. A.; FIOL, N.; VILLAESCUSA, I.; PEREIRA, H. (2013). **The Chemical Composition of Exhausted Coffee Waste**. *Industrial Crops and Products*. Volume 50, 2013, Pages 423-429. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.056>

QUÉNO, L. R. M.; SOUZA, A. N. de; COSTA, A. F. da; VALLE, A. T. do; JOAQUIM, M. S. **Aspectos Técnicos da Produção de Pellets de Madeira**. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 3, p. 1478–1489, 2019. DOI: 10.5902/1980509820606.

RECOFFEE. **A Recoffee**. 2023. Disponível em: <https://www.recoffeedesign.com.br/pagina/sobre-nos.html>. Acesso em: 27 out. 2023.

RIBEIRO, H. M.; MARTO, J.; RAPOSO, S.; AGAPITO, M. **From Coffee Industry Waste Materials To Skin-Friendly Products With Improved Skin Fat Levels**. *European Journal of Lipid Science and Technology* vol 115 (2013). <https://doi.org/10.1002/ejlt.201200239>

RIBEIRO, I. C. **Valorização Da Borra De Café Gerada Em Ambientes Institucionais Por Meio Da Técnica De Compostagem**. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Tecnologias Sustentáveis, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

ROCHA, A. L. L. **Desenvolvimento De Um Reator De Pirólise Em Escala De Bancada Para Tratamento De Resíduos Sólidos Urbanos**. 2016. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

SANTOS, C.; FONSECA, J.; AIRES, A.; COUTINHO, J.; TRINDADE, H. **Effect Of Different Rates Of Spent Coffee Grounds (SCG) On Composting Process, Gaseous Emissions And Quality Of End-Product.** 2017. Waste Management 59, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.020>

SAYNER, A. **Growing Mushrooms In Coffee Grounds.** 2019. Disponível em: <https://grocycle.com/growing-mushrooms-in-coffee-groundes/>. Acesso em: 16 out. 2023.

SDSNMX. **Innovacarb: Transforma El Residuo De Café En Carbón Activado Vegetal.** 2023. Disponível em: <https://sdsnmxico.mx/banco-de-proyectos/economia-circular-y-tecnologias-sostenibles/innovacarb/>. Acesso em: 13 nov. 2023.

SENAR. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Café: Cafés Especiais.** 2017. 104p. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/193-CAF%C3%89.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2022

SHIE, Talita. **História Do Café: A Origem E Trajetória Da Bebida No Mundo.** 2018. Disponível em: <https://www.graogourmet.com/blog/historia-do-cafe/>. Acesso em: 11 mar. 2022.

SILVA, L.R.; ANDRADE, P.; VALENTÃO, P. **Phenolic Compounds In Honey As Health Promoters.** Honey: Production, Consumption and Health Benefits, 81-111. 2012.

SOCOL, C.R. **Resíduo De Café: Um Substrato Promissor Para A Produção Industrial De Bioprodutos Com Alto Valor Agregado.** I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2002. Disponível em: http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/532/166699_Art03f.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 15 ago. 2023.

SOLOMAKOU, N.; LOUKRI, A.; TSAFRKIDOU, P.; MICHAELIDOU, A. M.; MOURTZINOS, I.; GOULA, A. M. **Recovery of phenolic compounds from spent coffee grounds through optimized extraction processes.** 2022. Sustainable Chemistry and Pharmacy vol 25. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100592>

SOUZA, L. A.; CARMO, D.; SILVA, F.; PAIVA, W. **Análise Dos Principais Parâmetros Que Influenciam A Compostagem De Resíduos Sólidos Urbanos.** 2020 8. 194-212. DOI:10.5281/zenodo.3970186

SOUZA, L. M. B. de. **Avaliação De Composto Orgânico Contendo Borra De Café Na Adubação Da Cultura Do Milho.** 2021. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias e Inovações Ambientais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

SPLABOR. **O Que É Um Extrator De Soxhlet.** 2023. Disponível em: <https://www.splabor.com.br/blog/vidraria/como-funciona-o-extrator-de-soxhlet-saiba-mais/>. Acesso em: mar. 2023.

TUDO SOBRE CAFÉ. **Café Robusta x Café Arábica: Entenda aqui a diferença.** 2022. Disponível em: <https://tudosobrecafe.com/cafe-robusta-x-cafe-arabica-diferenca>. Acesso em: 12 set. 2022.

UPCIRCLE. **Coffee Face Scrub – Floral Blend for Sensitive Skin**. 2023. Disponível em: <https://upcirclebeauty.com/products/coffee-face-scrub-floral-blend-100ml>. Acesso em: 27 out. 2023.

URBEN, A. F. **Produção De Cogumelos Por Meio De Tecnologia Chinesa Modificada: Biotecnologia E Aplicações Na Agricultura E Na Saúde**. 2017. Embrapa 3 ed. revista e ampliada, 274p. Brasília. ISBN: 978-85-7035-651-2

USDA, United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Coffee: World Markets and Trade**. USDA, 2023. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023.

WASTE. **UpCircle Makes Skin and Eye Care Products from Spent Coffee Grounds**. 2023. Disponível em: <https://www.waste360.com/organics/upcircle-makes-skin-and-eye-care-products-spent-coffee-grounds>. Acesso em: 26 out. 2023.

YEOH, L.; NG, K. S. **Future Prospects of Spent Coffee Ground Valorisation Using a Biorefinery Approach**. 2022. Resources, Conservation and Recycling vol 179. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106123>