



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**LUCAS CANTÃO SOARES**

**DIMENSIONAMENTO DE SEDIMENTADOR PARA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA  
RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DE CAFÉ: UM ESTUDO DE CASO**

**VITÓRIA  
2025**

LUCAS CANTÃO SOARES

**DIMENSIONAMENTO DE SEDIMENTADOR PARA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA  
RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DE CAFÉ: UM ESTUDO DE CASO**

Projeto de Graduação II apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Yuri Nascimento Nariyoshi  
Coorientadora: Eng<sup>a</sup>. Clarice Coswosk Salles

VITÓRIA

2025

# LUCAS CANTÃO SOARES

## **DIMENSIONAMENTO DE SEDIMENTADOR PARA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DE CAFÉ: UM ESTUDO DE CASO**

Projeto de Graduação II apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em 27 de agosto de 2025.

---

Prof. Dr. Yuri Nascimento Nariyoshi  
DEA/CT/UFES  
Orientador

---

Eng<sup>a</sup>. Clarice Coswosk Salles  
Global R&D/ArcelorMittal  
Coorientadora

---

Prof. Dr. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça  
DEA/CT/UFES  
Avaliador Interno

---

Dra. Caroline Forestti Oliveira  
R&D&I/Sol Solution SAS  
Avaliadora Externa

## RESUMO

A escassez hídrica é um desafio global crescente. Regiões com alta demanda agrícola de água são expressivamente impactadas nesse cenário, com destaque para o estado do Espírito Santo no Brasil. Nessa região, o cultivo de café conilon representa uma parcela substancial da agricultura nacional, tendo como um dos principais passivos ambientais a geração de grandes volumes de águas residuárias do processamento de café por via úmida (ARC), que contém elevado teor de resíduos sólidos do processo (partes vegetais, cascas e mucilagem dos frutos). Considerando a necessidade de promover a gestão eficiente de recursos hídricos na cafeicultura, realizou-se um estudo de caso voltado para a clarificação de uma ARC em colaboração com produtores rurais de uma associação da região norte do Espírito Santo, vislumbrando o reuso da água clarificada por meio de sua recirculação na unidade de processamento (UP) e em fertirrigação e uso dos sólidos espessados em compostagem. Uma amostra representativa da ARC foi analisada em laboratório, obtendo-se parâmetros cujos valores foram obtidos experimentalmente, como teor de sólidos, massa específica da fração sólida e taxa de sedimentação. Com base nesses resultados e utilizando os métodos de Kynch e Pavlov, foi dimensionado um sedimentador circular com área superficial de 26,88 m<sup>2</sup> (diâmetro de 6 m) e, por meio do método de Pavlov, altura total de 1,35 m, subdividida em zonas funcionais de clarificação (0,75 m), espessamento (0,10 m) e lodo (0,50 m). Essa abordagem mais realista, baseada no comportamento real do efluente, possibilitou um dimensionamento específico para a suspensão analisada, reduzindo riscos de sub ou superdimensionamento. Conclui-se que o sedimentador dimensionado apresenta potencial para viabilizar o reuso da água clarificada na UP e na fertirrigação, além de agregar valor ambiental e econômico pelo aproveitamento do lodo espessado em processos de compostagem. Este estudo se alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2, 6 e 12, ao promover práticas agrícolas sustentáveis, uso eficiente da água e valorização de resíduos da cafeicultura.

**Palavras-chave:** Água Residuária do Café. Caracterização Analítica. Dimensionamento. Sedimentador. Método Kynch. Método de Pavlov. ODS.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	8
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	10
2.1.	A IMPORTÂNCIA DO USO SUSTENTÁVEL DE ÁGUA NA CAFEICULTURA 10	
2.2.	PROCESSAMENTO DE CAFÉ VIA ÚMIDA E CARACTERÍSTICAS FÍSICO- QUÍMICAS DA ÁGUA RESIDUÁRIA GERADA (ARC) .....	11
2.4.	LIMITAÇÕES NA CLARIFICAÇÃO DA ARC .....	22
3.	METODOLOGIA .....	25
3.1.	COLETA DE INFORMAÇÕES.....	27
3.3.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA AMOSTRA.....	28
3.3.1.	Determinação da série de sólidos.....	29
3.3.1.1.	<i>Sólidos Suspensos Totais</i> .....	29
3.3.2.	Massa específica da fração sólida .....	30
3.4.	DIMENSIONAMENTO DO SEDIMENTADOR .....	31
3.4.1.	Velocidade de sedimentação .....	31
3.4.2.	Área do sedimentador.....	35
3.4.3.	Altura do sedimentador .....	38
4.1.	SÉRIE DE SÓLIDOS .....	41
4.2.	MASSA ESPECÍFICA DA FRAÇÃO SÓLIDA.....	42
4.3.	VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO .....	42
4.4.	DIMENSIONAMENTO DO SEDIMENTADOR.....	46
4.4.1.	Área .....	46
4.4.2.	Alturas.....	48
5.	CONCLUSÕES .....	51
6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	53
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura simplificada da estrutura do fruto do café.....	12
Figura 2 - Pontos de maturação do café. ....	13
Figura 3 - Representação esquemática do processamento de café via úmida. ....	15
Figura 4 - Organograma da série de sólidos. ....	29
Figura 5 - Termômetro digital utilizado na aferição da temperatura da amostra de ARC. .....	33
Figura 6 - Amostra da ARC armazenada em recipiente hermético de polietileno de 2 L após ser homogeneizada. ....	34
Figura 7 - Proveta graduada de 1000 mL e cronômetro digital utilizados no ensaio da taxa de sedimentação. ....	34
Figura 8 - Esquema de alturas de um sedimentador. ....	38
Figura 9 - Simplificação de Biscaia Jr. ....	40
Figura 10 - Curva de sedimentação obtida no ensaio pelo método de Kynch (1952). .....	43
Figura 11 - Variação da interface de espessamento da ARC aos 25 min. ....	44
Figura 12 - Variação da interface de espessamento da ARC aos 60 min. ....	44
Figura 13 - Corte transversal do decantador com a indicação das alturas calculadas (em metros). ....	49
Figura 14 - Representação do corte transversal tridimensional do decantador, com a indicação das alturas de cada zona da estrutura (sem escala). ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos relacionados à verificação da composição da ARC. ....	18
Tabela 2 - Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e exemplos da literatura (mg/L). ....	41
Tabela 3 - Medições obtidas no ensaio de sedimentação. ....	43
Tabela 4 - Conversão de volume (mL) para altura (cm) dos valores das medições obtidas no ensaio de sedimentação. ....	45
Tabela 5 - Valores calculados a partir de dados obtidos por meio do ensaio de proveta. ....	45
Tabela 6 - Parâmetros utilizados no dimensionamento do sedimentador. ....	46
Tabela 7 - Fração de sólidos calculada em cada altura da proveta. ....	46
Tabela 8 - Valores calculados referentes ao dimensionamento do sedimentador. ....	47
Tabela 9 - Valores das dimensões do sedimentador calculadas e adotadas (Fonte: Autoria própria). ....	47
Tabela 10 - Valores das alturas do sedimentador calculadas e adotadas ....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Desafios e as oportunidades identificados em trabalhos sobre gestão de ARC. ....	21
---	----

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez hídrica já se apresenta como uma realidade que afeta diversas regiões do mundo, incluindo o Brasil, onde a demanda por água destinada à agricultura intensiva tem se tornado cada vez mais desafiadora, onde estudos revelam que mais da metade dos rios brasileiros está com vazão comprometida, sobretudo nas áreas com alta atividade agrícola, o que evidencia a sobrecarga exercida sobre os recursos hídricos (USP; NATURE COMMUNICATIONS, 2025). No estado do Espírito Santo, que se destaca como o segundo maior produtor de café do país, responsável por aproximadamente 30% da produção nacional (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2025), a cafeicultura é a atividade mais impactante sobre a disponibilidade de recursos hídricos no estado (Conselho Federal de Engenharia e Agronomia - CONFEA, 2017), exercendo uma grande pressão nos recursos hídricos locais. Com a crescente preocupação de garantir a sustentabilidade da produção agrícola, a gestão eficiente da água torna-se prática essencial para as lavouras de café.

Nesse cenário, a clarificação de águas residuárias geradas no processamento de café por via úmida (ARC) se destaca como uma etapa de tratamento essencial a fim de possibilitar práticas de reuso. Essa etapa não apenas auxilia na conservação da água, mas também reduz o desperdício e o impacto ambiental associado.

A possibilidade de recirculação da ARC tratada diretamente na própria unidade de processamento (UP) representa um significativo avanço para a sustentabilidade hídrica da atividade, uma vez que é possível reutilizar essa água tratada na etapa de lavagem de frutos e/ou despolpa. Essa prática tem o potencial de reduzir drasticamente o consumo de água, chegando a níveis entre 8 e 22 litros por quilo de café, ante valores que podem ultrapassar 40 a 80 litros por quilo quando não há reciclagem (Wintgens, 2004). Além do benefício ambiental, essa alternativa também traz ganhos operacionais e econômicos, reforçando a eficiência do método proposto no trabalho, ao alinhar rigor técnico com viabilidade sustentável.

Ademais, outra possível alternativa de reuso da água clarificada é na fertirrigação, que pode ser viabilizada e otimizada por meio de um balanço de nutrientes (LO MONACO, 2005; MATOS, 2008). Em tempo, os sólidos espessados também encontram aplicação em práticas como a compostagem, contribuindo para a produção de adubo orgânico,



promovendo o retorno de nutrientes ao solo e fechando o ciclo sustentável dos resíduos do café (Dadi et al., 2019).

Desta forma, a implementação de uma operação eficaz para a clarificação da ARC proveniente do processamento de café via úmida, possibilita a adoção de práticas de reuso e aproveitamento da água clarificada, o que representa uma estratégia alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas – ONU (ONU, 2015). Nesse sentido, a prática de fertirrigação, ao utilizar a água clarificada como veículo para nutrientes, contribui diretamente para o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) ao otimizar a nutrição das culturas e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos, promovendo uma agricultura mais eficiente e sustentável. Aliado a isso, o reuso de água, possibilitado pela separação dos resíduos sólidos, está em consonância com o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento) ao promover a conservação dos recursos hídricos, reduzir o lançamento de efluentes no meio ambiente e fechar o ciclo da água na produção agrícola, diminuindo a pressão sobre as fontes de água doce e reduzindo a poluição ambiental (ONU, 2015). Adicionalmente, a compostagem dos sólidos espessados oriundos da clarificação pode contribuir para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), uma vez que transforma resíduos em adubo orgânico, fechando o ciclo de nutrientes e reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos (DADI et al., 2019).

Nesse contexto, este projeto tem como proposta dimensionar um sedimentador seguindo a metodologia do Método Kynch (1952) em conjunto com o Método de Pavlov (1981) para a clarificação da ARC de uma unidade produtora rural existente, localizada em São Mateus/ES. Para tal, são utilizados parâmetros cujos valores foram obtidos experimentalmente, a partir da caracterização físico-química de uma amostra representativa dessa ARC e da respectiva vazão de geração. Assim, os resultados obtidos não só contribuem para uma abordagem mais sustentável na agricultura, mas também ajudam a enfrentar os desafios atuais e futuros da escassez de água.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. A IMPORTÂNCIA DO USO SUSTENTÁVEL DE ÁGUA NA CAFEICULTURA**

A irregularidade e a diminuição da disponibilidade de água têm trazido sérias consequências para a cafeicultura brasileira. A escassez hídrica reduz drasticamente a produtividade, como já observado em períodos de seca intensa que resultaram em quedas de até um terço da produção nacional de café, refletindo em aumentos expressivos nos preços internacionais da commodity (Washington Post, 2025). Além disso, a instabilidade das chuvas tem levado os produtores a recorrerem cada vez mais à irrigação, elevando significativamente os custos de produção e impondo desafios logísticos, sobretudo em regiões de difícil acesso à água subterrânea (Reuters, 2025; Embrapa, 2023). O déficit hídrico também compromete o desenvolvimento das plantas e a qualidade dos grãos, afetando o florescimento, a uniformidade da maturação e a tendência natural de alternância de safra, o que impacta diretamente o valor de mercado do produto (ILSABRASIL, 2023). Como consequência, a instabilidade climática e hídrica ameaça a renda e a estabilidade econômica de milhares de famílias que dependem da cafeicultura, aumentando a vulnerabilidade social nas regiões produtoras (Reuters, 2025; Washington Post, 2025).

O café possui um papel de destaque no cenário agrícola brasileiro, sendo o Brasil o maior produtor mundial (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023). No estado do Espírito Santo, segundo maior produtor brasileiro, o café conilon possui grande impacto na economia do estado, com uma estimativa de produção de 13,1 milhões de sacas em 2025, crescimento de 33,1% em relação à safra anterior (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2025). Além disso, a cafeicultura nesse estado está presente em cerca de 60 mil propriedades agrícolas (das aproximadamente 90 mil existentes), envolve cerca de 131 mil famílias e gera por volta de 400 mil empregos diretos e indiretos (INCAPER, 2025; ES HOJE, 2023). Essa atividade também responde por aproximadamente 37% do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola capixaba, consolidando-se como um dos principais pilares da economia estadual (ES BRASIL, 2024; SEAG, 2024). Dessa forma, com a crescente demanda por café e a

valorização da segurança alimentar, o mercado tem exigido sistemas de produção que assegurem qualidade, certificação e respeito ao meio ambiente.

O agronegócio do café é financeiramente relevante, gera renda e emprego, adapta-se a terrenos acidentados, diversifica a produção (como café natural, cereja descascado, orgânico e especiais) e exige gestão eficiente (CONAB, 2023; INCAPER, 2025). Nos últimos anos, a preocupação ambiental ganhou ainda mais destaque, reforçando que o crescimento econômico deve ser sustentável, conforme ressaltado por cooperativas de cafeicultores que destacam a importância da gestão integrada e da preservação do meio ambiente para a rentabilidade do setor (SEBRAE, 2022).

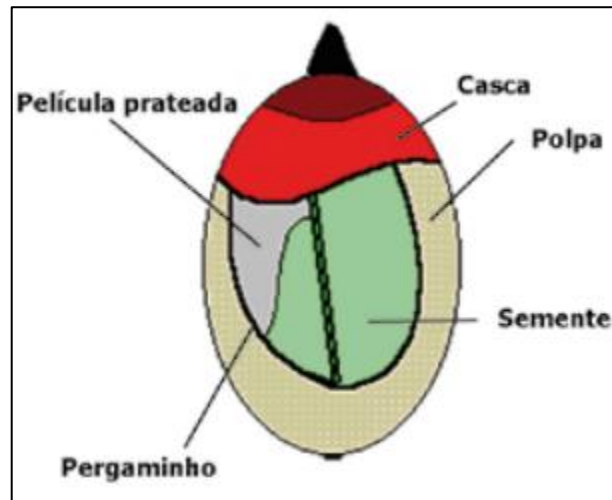
A conscientização ecológica, impulsionada pela sociedade, governo e consumidores, tem demandado mudanças na cadeia produtiva, com maior valorização de cafés certificados e com baixa pegada ambiental (FAO, 2021; CECAFÉ, 2023). Além disso, a legislação ambiental, os custos de tratamento de efluentes e a pressão do mercado por práticas sustentáveis são fatores determinantes nesse processo (MMA, 2021).

Nesse contexto, o processamento por via úmida do café surge como uma alternativa para a mitigação deste problema. Apesar de demandar custos fixos e operacionais adicionais, como lavadores e separadores, sistemas de coleta, transporte e tratamento de águas residuárias, além do licenciamento ambiental para captação e descarte de efluentes (CETESB, 2020; ANA, 2021), a prática do reúso da água destaca-se como alternativa estratégica para reduzir custos e preservar os recursos hídricos (HESPANHOL; MIERZWA, 2019). A recirculação da água nas unidades de processamento, por exemplo, possibilita a diminuição da captação em mananciais e a redução da carga de efluentes lançados no meio ambiente (CETESB, 2020; FAO, 2021).

## 2.2. PROCESSAMENTO DE CAFÉ VIA ÚMIDA E CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA RESIDUÁRIA GERADA (ARC)

O café recém-colhido é classificado como um fruto, dada sua estrutura composta por casca, polpa, pergaminho, película prateada e sementes (Embrapa, 2013), conforme é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura simplificada da estrutura do fruto do café.



Fonte: Embrapa (2013).

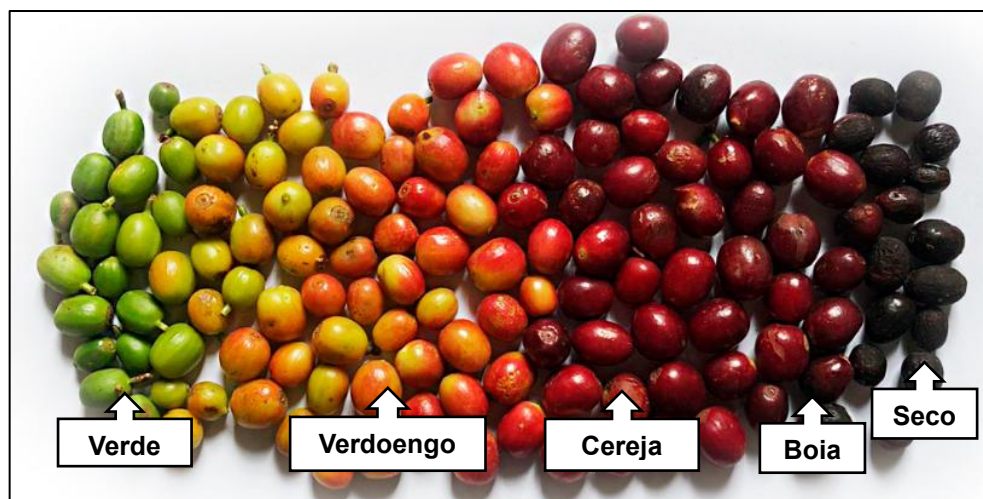
O processamento do fruto do cafeeiro pode ser realizado pelos métodos via seca ou via úmida. No Brasil, tradicionalmente predomina o processamento por via seca, que ainda representa a maior parte da produção nacional, correspondendo a cerca de 80–85% dos grãos beneficiados (PEREIRA et al., 2020; RIBEIRO et al., 2021). Entretanto, observa-se um crescimento expressivo da adoção do processamento por via úmida, especialmente em propriedades voltadas para cafés especiais, uma vez que essa tecnologia agrega valor ao produto, melhora a qualidade sensorial da bebida e possibilita alcançar melhores preços no mercado internacional (MOURA et al., 2017; CARVALHO et al., 2022).

No processamento por via úmida, a obtenção de cafés de qualidade superior depende da colheita de frutos no estágio de maturação denominado “cereja”, caracterizado pela coloração vermelho-intensa, que confere maior uniformidade à fermentação e ao perfil sensorial da bebida (PIMENTA et al., 2018). No entanto, devido à maturação desuniforme dos frutos no cafeeiro, muitas vezes são necessárias várias passagens na lavoura para colher apenas frutos maduros. Como a colheita manual ainda é predominante em diversas regiões produtoras, esse processo se torna oneroso, o que leva muitos cafeicultores a realizarem apenas uma colheita, resultando em lotes mistos contendo frutos verdes, maduros e passas (SILVA et al., 2019).

A separação dos frutos colhidos em diferentes estágios pode ser realizada nas etapas iniciais do processamento úmido, por meio da lavagem e da classificação mecânica ou hidráulica, permitindo distinguir frutos verdes, maduros (cerejas), imaturos

(verdoengos), passas (boias) e secos (podres), além de remover impurezas como folhas, ramos e torrões. Essa prática possibilita a formação de lotes mais homogêneos, o que contribui para maior consistência na qualidade da bebida e para o aumento da competitividade no mercado de cafés especiais (RIBEIRO et al., 2021; CARVALHO et al., 2022).

Figura 2 - Pontos de maturação do café.



Fonte: Adaptado de Perfect Daily Grind Ltd (2025).

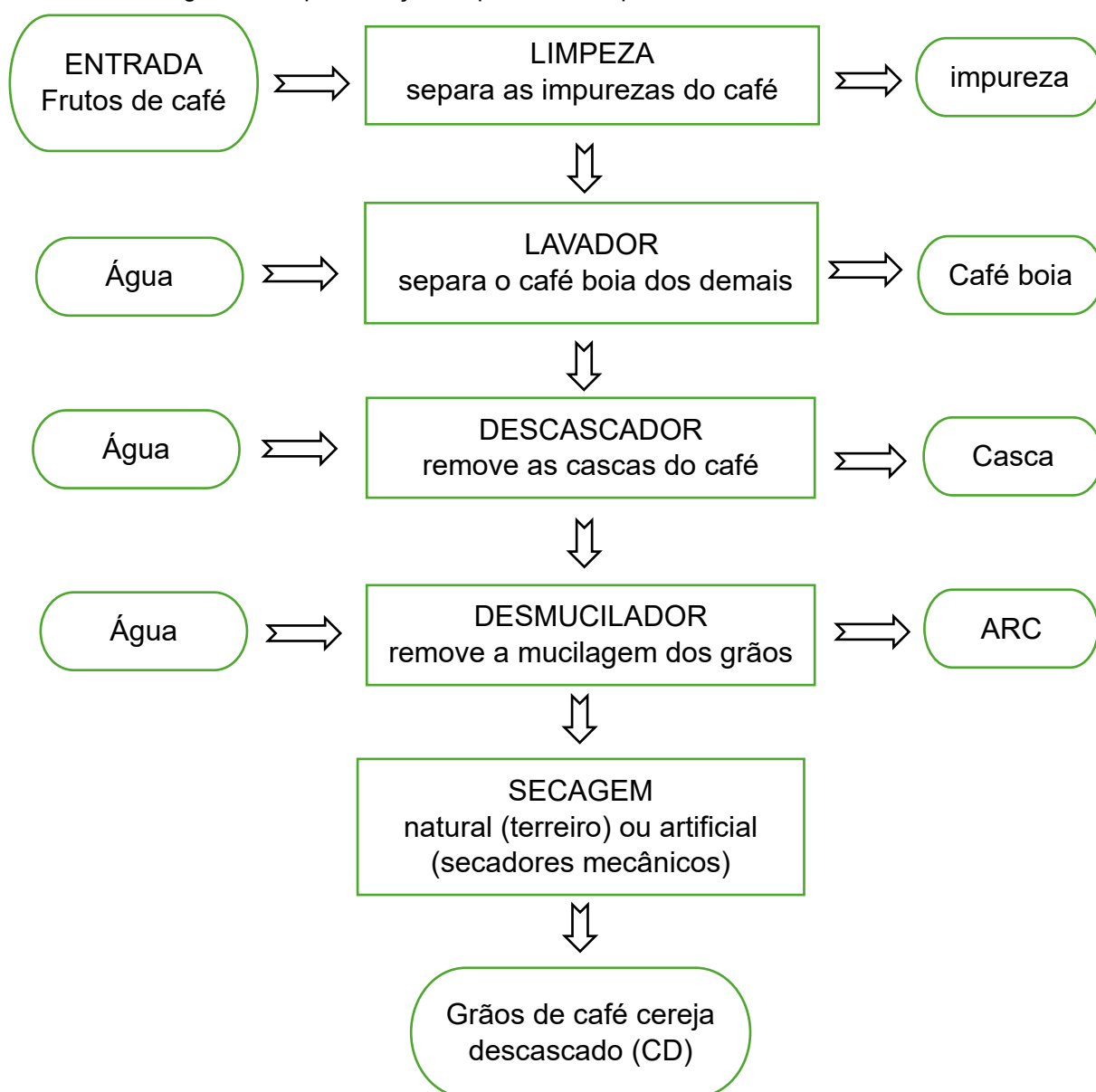
No processamento úmido do café, os frutos passam inicialmente por uma etapa de lavagem e separação hidráulica, na qual ocorre a distinção entre frutos “boia” (flutuantes, geralmente passas, secos e defeituosos) e frutos cerejas e verdes, que apresentam maior densidade e afundam na água. Essa etapa é essencial para a melhoria da uniformidade do lote e da qualidade final do café (PEREIRA; BORÉM; TAVEIRA, 2020). Em seguida, os frutos cerejas são direcionados ao descascador, onde ocorre a remoção da casca. As cascas, em sua maioria compostas por polpa e exocarpo, podem ser utilizadas para compostagem ou produção de subprodutos, reduzindo impactos ambientais (CARVALHO et al., 2022). Após o descascamento, os grãos ainda envolvidos pela mucilagem (camada viscosa e pegajosa que envolve o grão após a remoção da polpa) seguem para a etapa de desmucilagem, que pode ser realizada de forma mecânica, por meio de desmuciladores, ou de forma biológica, em tanques de fermentação (ou degomagem) controlada, visando preservar compostos aromáticos importantes para a bebida (MOURA et al., 2017; RIBEIRO et al., 2021).

A estrutura convencional de um sistema de processamento úmido de café segue, de forma geral, as seguintes etapas principais (PIMENTA; VILELA; CARVALHO, 2018; SILVA; ANDRADE; FERREIRA, 2019):

- I. Entrada: recebimento dos frutos oriundos da colheita;
- II. Pré-limpeza: retirada de impurezas sólidas (folhas, ramos, pedras e torrões) por corrente de ar ou peneiramento;
- III. Lavagem e separação hidráulica: frutos são imersos em água, possibilitando a separação dos flutuantes (boias) dos frutos cerejas, que seguem para o descascamento;
- IV. Descascamento: separação dos frutos verdes e remoção da casca dos frutos cerejas, etapa que geralmente utiliza adição de água limpa para facilitar o transporte e operação;
- V. Desmucilagem: retirada da mucilagem aderida ao pergaminho, que pode ocorrer por atrito mecânico em desmuciladores ou pela fermentação natural em tanques com ou sem água, dependendo da tecnologia adotada;
- VI. Secagem: realização de secagem das sementes processadas de forma natural (terreiro) ou artificial (secadores mecânicos).

Essas etapas, quando realizadas de maneira controlada, são fundamentais para garantir uniformidade, redução de defeitos e melhoria da qualidade sensorial do café, além de promover maior valorização no mercado, principalmente no segmento de cafés especiais (RIBEIRO et al., 2021; CARVALHO et al., 2022). A Figura 3 apresenta uma representação esquemática do processo em questão.

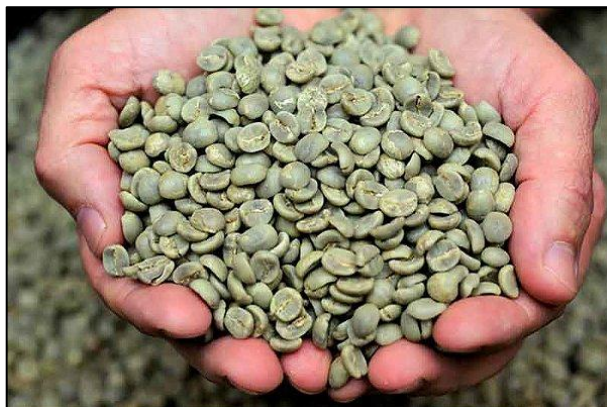
Figura 3 - Representação esquemática do processamento de café via úmida.



Fonte: O autor (2025).

Após processados, são obtidas as sementes, também conhecidas como grãos de café, café beneficiado, café cereja descascado (CD) ou *Green coffee* (“café verde”), as quais são exportados ou comercializados diretamente para a indústria nacional de torrefação (Embrapa, 2013).

Figura 4 - Grãos de café beneficiados “café verde” ou *Green Coffee*.



Fonte: Casa Branca Orgânica (2025).

Vale ressaltar que a água desempenha papel essencial no processamento de frutos de café nas UP's, sendo utilizada para transporte, lavagem e separação dos frutos. A lavagem e separação mecânica consomem volumes relativamente baixos, entre 0,1 e 0,3 L por litro de frutos, enquanto o descascamento requer maior quantidade, variando de 3 a 5 L por litro de fruto (PEREIRA; BORÉM; TAVEIRA, 2020; SILVA; ANDRADE; FERREIRA, 2019). Como resultado, a água misturada aos resíduos do processo gera a ARC, composta por sólidos suspensos, matéria orgânica e nutrientes solúveis.

O planejamento das UP's deve priorizar a redução do consumo hídrico e a reutilização da ARC, especialmente no descascamento, o que diminui a demanda por água e os custos operacionais (CARVALHO; OLIVEIRA; MENDONÇA, 2022; PIMENTA; VILELA; CARVALHO, 2018). Para viabilizar essa prática, tecnologias de separação rápida de sólidos suspensos são essenciais, permitindo a recirculação da água sem comprometer a qualidade do processamento.

O fruto cereja de café apresenta composição altamente aquosa, com cerca de 70 a 75% de água e subprodutos que, se não aproveitados, podem gerar impactos ambientais significativos (MOURA et al., 2017; RIBEIRO; CARVALHO; PEREIRA, 2021). A ARC gerada contém macro e micronutrientes, resíduos sólidos provenientes de folhas, ramos, cascas e mucilagem, além de apresentar elevada carga orgânica (CARVALHO; OLIVEIRA; MENDONÇA, 2022). Sua alta concentração de sólidos e compostos voláteis exige estratégias de manejo eficiente, alinhadas às diretrizes ambientais de redução de geração de efluentes e reuso de água (CONAMA, 2011).



Estudos recentes indicam que a concentração de sólidos totais (ST) na ARC pode variar de 10.000 a 20.000 mgL<sup>-1</sup>, enquanto sólidos suspensos (SS) e sólidos voláteis (SV) alcançam 2.500–4.000 mgL<sup>-1</sup> e 12.000–15.000 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente (PREZOTTI et al., 2012; SILVA; ANDRADE; FERREIRA, 2019). A polpa do café contém açúcares, proteínas, fibras e compostos fenólicos, que contribuem para o aumento da carga orgânica da ARC. A presença de frutos verdes e não selecionados aumenta a acidez do efluente, resultando em pH tipicamente ácido, variando entre 4,2 e 5,0 (CAMPOS; PRADO; PEREIRA, 2010).

A composição nutricional da ARC é rica em nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e micronutrientes como boro, cobre e zinco, variando conforme o estágio do fruto e o número de recirculações da água (PREZOTTI et al., 2012; SILVA; DONZELES; CORRÊA, 2008). Estudos recentes mostram teores de potássio (K) e nitrogênio (N) entre 250 e 875 mgL<sup>-1</sup> e 150 e 205 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente, enquanto micronutrientes como boro aparecem em menores concentrações (PREZOTTI et al., 2012; MORELI, 2010).

Parâmetros físico-químicos da ARC, incluindo demanda química de oxigênio (DQO), entre 15.000 e 17.000 mgL<sup>-1</sup>, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), variando entre 8.500 e 9.500 mgL<sup>-1</sup>, condutividade elétrica (4,5–5,0 dSm<sup>-1</sup>), salinidade (2–3%) e compostos fenólicos (900–1.000 mgL<sup>-1</sup>), demonstram seu potencial poluidor, exigindo tratamento adequado antes de qualquer reuso ou descarte (CAMPOS; PRADO; PEREIRA, 2010; PIMENTA; VILELA; CARVALHO, 2018).

Diversos outros estudos analisaram a composição e o impacto ambiental da ARC. Riqueira, Lacerda Filho e Matos (2005) identificaram concentrações elevadas de sólidos (ST, SS, SF e SV) durante o processamento de frutos de café, mostrando o potencial poluidor do efluente gerado. A concentração de sólidos aumentou significativamente com o volume processado, indicando o acúmulo de matéria orgânica. A composição química da polpa, rica em compostos como taninos e ácidos, varia com o tipo de grão, influenciando a acidez da ARC, geralmente baixa, conforme observado por Campos, Prado e Pereira (2010). Soares *et al.* (2009) e Prezotti *et al.* (2012) detectaram grandes variações nas concentrações de nutrientes (como nitrogênio, fósforo e potássio), associadas ao tipo de processamento e à reutilização da água, com o potássio sendo o elemento mais abundante. Moreli (2010) mostrou

que o tempo de reutilização da água aumenta significativamente a concentração de nutrientes. Já Campos, Prado e Pereira (2010) destacaram os altos teores de DQO, DBO5, salinidade, compostos fenólicos e óleos e graxas na ARC, indicando um elevado potencial de poluição e restrições ao seu uso agrícola sem tratamento.

Tabela 1 - Trabalhos relacionados à verificação da composição da ARC.

<b>Autor(es)</b>	<b>Parâmetros Avaliados</b>	<b>Valores Encontrados</b>
Riqueira, Lacerda Filho e Matos (2005)	Sólidos Totais (ST), Suspensos (SS), Fixos (SF), Voláteis (SV); ST na água de lavagem	ST: 12.826–18.881 mg/L SS: 2.640–3.633 mg/L SF: 1.267–3.594 mg/L SV: 11.559–15.287 mg/L ST após lavagem: até 5.038 mg/L
		pH: 4,54 DQO: 16.452 mg/L DBO5: 9.011 mg/L CE: 4,9 dS/m Salinidade: 2,56% N: 99,9 mg/L Fenólicos: 954,2 mg/L Óleos e graxas: 194 mg/L
Campos, Prado e Pereira (2010)	pH, DQO, DBO5, CE, Salinidade, N total, Compostos fenólicos, Óleos e graxas	N: 112–1194 mg/L P: 5–102 mg/L K: 90–983 mg/L Ca: 11–413 mg/L Mg: 4–22,3 mg/L Cu: 0,13–37,8 mg/L Mn: 0,21–0,48 mg/L Fe: 0,09–9,4 mg/L Zn: 0,07–7,1 mg/L
Soares et al. (2009)	Nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Cu, Mn, Fe, Zn)	
Moreli (2010)	Concentração e acúmulo de nutrientes com o tempo	K: 293 mg/L (acúmulo 1,8086 mg/L/min) N: 161 mg/L (acúmulo 1,026 mg/L/min) Ca: 32 mg/L (acúmulo 0,1814 mg/L/min)

Fonte: O autor (2025).

### 2.3. DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA GESTÃO DA ARC

A gestão da ARC envolve simultaneamente desafios e oportunidades. De um lado, os diversos nutrientes e compostos orgânicos presentes nesse efluente – como potássio, açúcares, cafeína e polifenóis – quando lançados no ambiente sem tratamento adequado, podem comprometer a qualidade das águas superficiais e causar impactos negativos à fauna e à flora aquáticas (CARVALHO; OLIVEIRA; MENDONÇA, 2022; MATOS, 2010). Por outro lado, esses mesmos constituintes conferem à ARC um potencial de reaproveitamento que, se devidamente tratado, transforma-se em oportunidade estratégica para as UP's. Nesse sentido, a reutilização da ARC não apenas contribui para a economia de água, mas também reduz os impactos ambientais associados à sua disposição inadequada, reforçando sua relevância como instrumento de gestão hídrica sustentável (IMHOFF, 1986; PEREIRA; BORÉM; TAVEIRA, 2020).

Entretanto, a adoção do reuso da ARC requer planejamento cuidadoso. Fatores técnicos, operacionais e econômicos limitam a eficiência dessa prática. O acúmulo de sólidos dissolvidos e suspensos após múltiplas recirculações pode tornar a água inadequada para uso contínuo, sendo necessário implementar sistemas de tratamento e clarificação (MIERZWA; HESPANHOL, 2005; SOARES et al., 2008).

Nas UP's, a clarificação da ARC é normalmente realizada por operações de separação sólido-líquido, como tanques de sedimentação, peneiras rotativas ou centrífugas. Sem essa etapa, ocorre acúmulo de resíduos sólidos nas tubulações, entupimentos e paradas operacionais. Sistemas combinados têm demonstrado maior eficiência, como o uso de tanques de sedimentação interligados e peneiras estáticas, alcançando reaproveitamento de até 0,9 L de água por litro de fruto processado (MORELI et al., 2010; CABANELLAS, 2004).

Estudos mostram que tanques de sedimentação podem remover até 75% dos sólidos totais (ST), enquanto peneiras pressurizadas alcançam apenas 14%; combinando ambas as tecnologias, a eficiência é maximizada (RAGGI; MATOS; LUIZ, 2008; MATOS, 2008). Alternativas de filtragem orgânica, como serragem de madeira e bagaço de cana, apresentam remoção de ST entre 40% e 65% (LO MONACO et al., 2002).

Assim, a eficiência na remoção de sólidos é crucial para que a ARC esteja em conformidade com a legislação ambiental. A Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, estabelece as condições, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos hídricos receptores, complementando a Resolução nº 357/2005. Essa norma define limites máximos de poluentes, como DBO, óleos e graxas, metais pesados e nutrientes, além de determinar critérios de monitoramento e controle ambiental para assegurar que a disposição de efluentes não comprometa a qualidade da água nem os usos preponderantes definidos para o corpo receptor. No contexto do presente trabalho, a Resolução nº 430/2011 é relevante pois reforça a necessidade de tratamento adequado da ARC, de modo a atender padrões ambientais antes de seu uso na fertirrigação, assegurando tanto a eficiência agrícola quanto a proteção ambiental (BRASIL, 2011). Além disso, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece limites de pH (5–9) e sólidos sedimentáveis (<1 mg/L) para lançamento de efluentes em corpos d'água. Como a ARC geralmente não atende a esses padrões, seu lançamento direto é proibido. Nesse contexto, a fertirrigação surge como alternativa sustentável, permitindo o reaproveitamento de nutrientes mediante manejo adequado (CAMPOS; PRADO; PEREIRA, 2010; PIMENTA; VILELA; CARVALHO, 2018).

Ademais, os nutrientes contidos da ARC, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, podem ser utilizados para fertilização e melhoria da fertilidade do solo (PREZOTTI et al., 2012; SILVA; DONZELES; CORRÊA, 2008). Para aplicação agrícola, é necessário controlar a distribuição e a dosagem, evitando salinização, encharcamento e déficit de oxigênio radicular. Métodos de irrigação por aspersão são recomendados, enquanto gotejamento e microaspersão exigem filtração para prevenir obstruções, reduzindo teor de matéria orgânica e nutrientes (PREZOTTI et al., 2012).

Estudos indicam que aplicações elevadas de ARC podem causar fitotoxicidade, lixiviação de cálcio e magnésio e queimadura de plantas, sendo essencial adequar doses à necessidade nutricional da cultura. Por exemplo, a fertirrigação de milho com 5 L/m<sup>2</sup> de ARC aumentou o pH, os teores de nutrientes e a biomassa vegetal, com ganhos de até 62 g por planta (LO MONACO et al., 2009; PREZOTTI et al., 2012).

Quadro 1 - Desafios e as oportunidades identificados em trabalhos sobre gestão de ARC.

<b>Aspecto</b>	<b>Desafios Identificados</b>	<b>Oportunidades Potenciais</b>	<b>Autores</b>
Tratamento de sólidos	Eficiência limitada de peneiras estáticas devido à formação de tortas e necessidade de limpeza constante	Uso combinado de tanques de sedimentação, peneiras vibratórias/rotativas e filtros orgânicos aumenta a eficiência (até 75%)	Carvalho (2001), Jordão e Pessoa (1995), Raggi, Matos e Luiz (2008), Cabanellas (2004), Matos (2008)
Recirculação de água	Reutilização limitada sem tratamento adequado; risco de acúmulo de sólidos e entupimentos	Sistemas como o de Moreli <i>et al.</i> (2010) mostraram reaproveitamento de 0,9 L de água por litro de fruto	Moreli <i>et al.</i> (2010)
Conformidade legal	ARC geralmente fora dos padrões da CONAMA 430/2011 (pH e materiais sedimentáveis), impedindo o descarte direto	Tratamento adequado pode viabilizar o uso da ARC em fertirrigação, evitando impactos ambientais	Campos, Prado e Pereira (2010)
Fertirrigação	Risco de encharcamento, salinização do solo e queimadura de plantas em altas doses; necessidade de controle preciso	Uso da ARC como fertilizante líquido, rico em macro e micronutrientes, reduzindo uso de adubos minerais	Lo Monaco <i>et al.</i> (2009), Prezotti <i>et al.</i> (2012)
Distribuição da ARC	Necessidade de homogeneidade e controle da dosagem; alguns sistemas exigem filtração prévia	Sistemas por aspersão de alta vazão (1.000 L/h) são recomendados e viáveis para aplicação eficiente	Prezotti <i>et al.</i> (2012)
Impacto no solo e planta	Potencial de lixiviação de nutrientes em doses elevadas; possível alteração na composição do solo	Aumento do pH do solo, da biomassa vegetal e dos teores de nutrientes em culturas como o milho	Silva, Donzeles e Corrêa (2008), Prezotti <i>et al.</i> (2012)

Fonte: O autor (2025).

Além dos aspectos técnicos, a gestão da ARC é influenciada pela legislação e políticas de licenciamento. A Instrução Normativa nº 013/2007 (IEMA, 2007) orienta que o manejo da ARC seja realizado via fertirrigação ou estabilização em lagoas. Políticas de outorga e cobrança pelo uso da água têm incentivado a adoção de práticas de reaproveitamento, reduzindo custos e impactos ambientais, ao mesmo tempo em que estimulam uma gestão mais racional e sustentável dos recursos hídricos (HENDGES, 2015; ANA, 2020).

O tratamento da ARC, apesar do custo adicional, é fundamental para garantir segurança ambiental e viabilidade operacional. Muitas propriedades ainda utilizam reservatórios de sedimentação e lagoas de infiltração para armazenamento e descarte, localizados em áreas elevadas e afastadas de mananciais, visando minimizar riscos de poluição (SOARES et al., 2007b). Assim, a clarificação da ARC, aliada a tecnologias acessíveis, legislação clara e apoio técnico, transforma o desafio da gestão hídrica em uma oportunidade para a sustentabilidade da cafeicultura.

## 2.4. LIMITAÇÕES NA CLARIFICAÇÃO DA ARC

Atualmente, o sistema desenvolvido pela Embrapa Café, Epamig e o Incaper tem sido utilizado por cafeicultores para clarificação da ARC (Embrapa, 2013). A estrutura desse sistema é constituída por três caixas de polietileno para a sedimentação/flotação e duas peneiras filtros (Figura 5). Três caixas de 1000 L são interligadas por tubos de PVC de 100 mm e duas peneiras cilíndricas metálicas. A primeira e a segunda peneira, com 22 cm de diâmetro e 100 cm de comprimento, são construídas em malhas de 1,5 mm e 1,00 mm, respectivamente. São dispostas em sequência, com inclinação de 30°, entre a saída da água da terceira caixa e o tanque de bombeamento para a caixa de reuso (Figura 6). As caixas retêm os resíduos mais densos que a água por sedimentação e os menos densos por flotação. Os resíduos, com potencial para obstruir os esguichos do cilindro do descascador, carregados para fora da terceira caixa, são retidos nas peneiras, que atuam como uma espécie de filtro, do sistema de limpeza de água residuária (SLAR). Assim que a água tenha sido usada em quatro ou cinco recirculações, ela é destinada ao processo de fertirrigação e o resíduo das caixas (sólido espessado e sólido sobrenadante) é encaminhado para o processo de compostagem (Embrapa, 2013).



Figura 5 - Caixas de decantação de sistema de limpeza de águas residuárias.



Fonte: Circular Técnica, Embrapa (2013).

Figura 6 - Peneiras de retenção.



Fonte: Circular Técnica, Embrapa (2013).

Um modelo do sistema em questão foi investigado por Moreli (2010) na Fazenda Experimental do Incaper, em Venda Nova do Imigrante/ES. Primeiramente mediu-se o consumo de água do sistema sem recirculação e o consumo foi de 2,2 litros de água por litro de café. Em seguida, realizou-se o processamento com a utilização do sistema de recirculação que durou de 142 a 155 minutos, tempo suficiente para que a água fosse reutilizada quatro vezes na unidade, sem causar entupimento, comprovando a funcionalidade do SLAR. Foram consumidos 0,52 L de água por litro de frutos processados, em média, muito abaixo dos 3 a 5 L mencionados na literatura (MATOS,

2008) e 76% menos que o consumo inicial. Na avaliação sensorial, segundo SOARES, MORELI, DONZELES e PREZOTTI (2013), não foi detectado diferença na bebida originada do café cereja descascado com água limpa ou reusada.

Além do sistema supracitado, outras metodologias vêm sendo testadas para a clarificação da ARC. Entre elas, está a associação entre coagulação-floculação e flotação por ar dissolvido (C/FAD). Nesse processo, agentes coagulantes são empregados para promover a agregação das partículas em flocos, que posteriormente são removidos por flotação. Estudos recentes indicam que a utilização de coagulantes naturais, como sementes de *Moringa oleifera* e cladódios de *Hylocereus polyrhizus* (pitaya), apresenta resultados promissores, com remoções de até 71,8% de compostos absorventes de UV 254 nm e mais de 50% da turbidez da ARC (Silva et al., 2019). Apesar de sua eficiência, o método apresenta limitações, pois depende fortemente da escolha do coagulante e de condições pré-definidas, sem levar em consideração as particularidades físico-químicas de cada unidade processadora. Isso pode resultar em desempenho variável e até ineficiente quando aplicado em situações diferentes daquelas observadas experimentalmente.

Outro procedimento alternativo é a eletrofloculação, que consiste na aplicação de corrente elétrica em um reator eletrolítico com eletrodos de alumínio, promovendo reações eletroquímicas capazes de reduzir a carga orgânica e facilitar a remoção de sólidos suspensos (Rodrigues et al., 2017). Embora essa técnica apresente potencial de eficiência, ela também se baseia em parâmetros operacionais generalizados, o que pode comprometer sua aplicabilidade prática em diferentes realidades produtivas. Além disso, apresenta desafios relacionados ao custo energético e à necessidade de manutenção dos eletrodos, aspectos que podem inviabilizar sua adoção em escala comercial por pequenos e médios produtores.

Dessa forma, observa-se que o uso de metodologias padronizadas para o tratamento da ARC pode apresentar limitações relevantes devido à ampla variação físico-química observada entre diferentes UP's. Conforme observado por Fernández *et al.* (2018), efluentes provenientes de lavagens de café variam consideravelmente em parâmetros como carga orgânica, cor, acidez, sólidos suspensos e temperatura, dependendo das práticas operacionais, do volume de mucilagem e das condições locais de produção. Portanto, projetos baseados majoritariamente em valores padrões da literatura podem



não representar fielmente a realidade da UP. A ausência de dados que representem o comportamento real da ARC, como a concentração de sólidos, vazões reais, taxa de sedimentação e densidade da suspensão, pode levar a sistemas subdimensionados, com desempenho aquém do necessário, ou superdimensionados, com custos excessivos e uso ineficiente de recursos. Nesse sentido, este trabalho busca evitar tais falhas ao fundamentar o dimensionamento nas características reais da ARC analisada, garantindo eficiência técnica e adequação à realidade operacional.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu em primeiramente realizar uma caracterização físico-química de uma amostra de ARC da UP para posteriormente obter dados que foram utilizados como parâmetros no dimensionamento de um decantador para a clarificação do efluente em questão, cuja metodologia foi baseada no do método de Kynch (1952) em conjunto com o método de Pavlov *et al.* (1981).

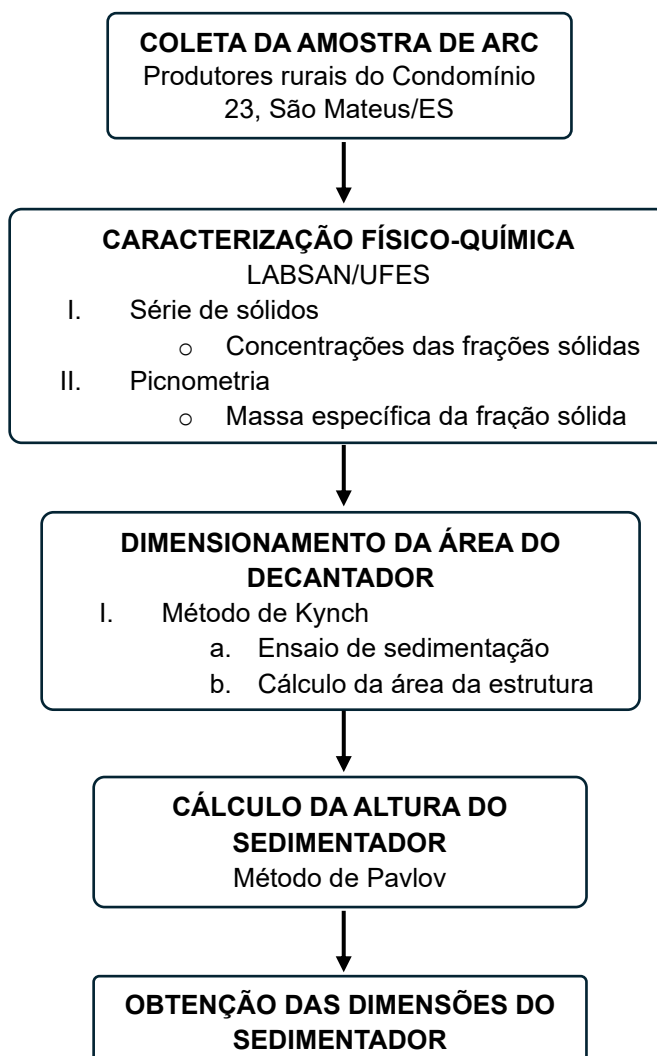
Inicialmente procedeu-se com a caracterização físico-química de uma amostra de ARC fornecida por produtores rurais do Condomínio Conilon 23, localizada em São Mateus/ES. Posteriormente, por meio de uma série de sólidos foi possível determinar a concentração da fração de sólidos de interesse presente na ARC. Além disso, foi obtida a massa específica da fração sólida presente no efluente por meio da utilização de um picnômetro, onde ambos procedimentos foram conduzidos no Laboratório de Saneamento (LABSAN) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Com posse desses resultados, foram calculadas as concentrações comuns da ARC e da fração sólida presente nela (lama).

Com esses dados, procedeu-se com procedimento via método de Kynch (1952). Para tanto, primeiramente foi feita a verificação da taxa de sedimentação da ARC, sendo necessário um único ensaio de bancada em laboratório para coletar dados do parâmetro em questão, assim como prevê o método supracitado usado. A amostra foi deixada em temperatura ambiente, onde sua temperatura foi aferida antes do início do ensaio. Para a realização do procedimento, foram utilizados 1 (uma) proveta graduada de 1000 mL, 1 (um) cronômetro digital e 1 (uma) tabela física para preenchimento. A análise consistiu em anotar, a cada 5 (cinco) minutos, a altura da

fase particulada à medida que esta se sedimentava com o passar do tempo, cujo período total de duração do experimento foi de 60 minutos. Feito isso, foi traçada uma curva de sedimentação com as medidas obtidas, onde foi possível calcular a velocidade com a qual a sedimentação ocorria. Aliado a isso, por meio da teoria de Kynch (1952), foi possível obter outros dados que foram utilizados para o cálculo da área da estrutura, valores estes utilizados no dimensionamento. Por fim, foi calculada a altura do sedimentador, obtida através do cálculo proposto por Pavlov *et al.* (1981). Dessa forma, foi possível obter as dimensões da estrutura para o adequado tratamento da ARC, a qual foi baseada em parâmetros cujos valores foram obtidos de forma experimental.

A Figura 7 apresenta um organograma resumido de toda a metodologia executada.

Figura 7 - Organograma das etapas metodológicas.



Fonte: O autor (2025).

### 3.1. COLETA DE INFORMAÇÕES

A etapa inicial do projeto consistiu na coleta de informações técnicas e contextuais a respeito do processo gerador do efluente, bem como da amostra de ARC utilizada no estudo. Essa fase foi essencial para subsidiar as etapas posteriores de caracterização físico-química e de dimensionamento da unidade de tratamento.

A vazão de alimentação da ARC foi informada pelos produtores rurais do Condomínio Conilon 23, localizado no município de São Mateus/ES. Para a realização das análises laboratoriais, foi disponibilizada uma amostra representativa de ARC coletada diretamente na unidade de processamento.

Além dos dados relativos à amostra e à vazão, foram coletadas informações sobre o contexto produtivo da associação, como o processo de produção do conilon CD da associação, composto pelas seguintes etapas:

- a) Entrada: recebimento dos frutos maduros provenientes da colheita;
- b) Limpeza: remoção de impurezas (folhas, ramos, entre outros) por corrente de ar e peneiramento;
- c) Lavagem/Separação: imersão em tanque com água, separando frutos boias (descartados) e frutos densos (destinados ao descascador);
- d) Descascamento: separação mecânica das cascas dos frutos cereja maduros, com adição de água limpa para facilitar a operação;
- e) Desmucilagem: remoção mecânica da mucilagem aderida aos grãos, também com adição de água;
- f) Geração de efluente: produção da ARC composta majoritariamente por cascas e mucilagem em suspensão, com concentração estimada de 2% de sólidos.

Assim os dados coletados permitiram entender o funcionamento da UP e a realização de uma caracterização físico-química detalhada da ARC, etapa fundamental para determinar as concentrações de sólidos, nutrientes e outros parâmetros de qualidade da ARC. Esses resultados forneceram a base necessária para o dimensionamento do sedimentador, permitindo propor uma solução técnica adequada ao tratamento da ARC gerada no processamento do Café Conilon Cereja Descascado.

### 3.2. AMOSTRAGEM

Foi utilizada uma amostra representativa de ARC fornecida pela associação de produtores rurais denominada “Condomínio Conilon 23”, localizada no município de São Mateus/ES. A amostra foi coletada pelos próprios produtores e armazenada em recipiente herméticos de polietileno com capacidade de 2 L, sendo a coleta realizada no mês de julho de 2024 e disponibilizada para caracterização físico-química somente em novembro de 2024 (quatro meses após a coleta). Essa amostra foi armazenada em temperatura ambiente, sem ação de preservação física e química.

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA AMOSTRA

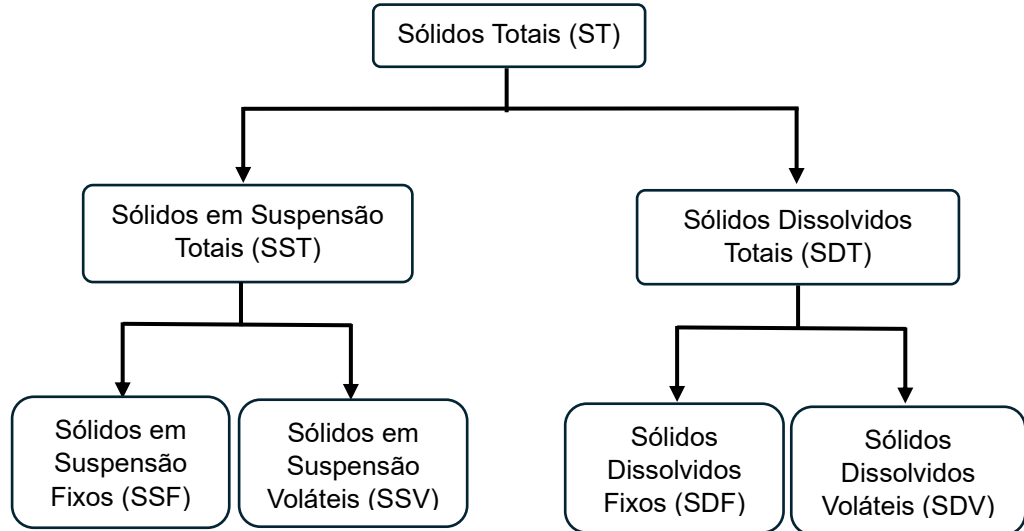
A caracterização físico-química da ARC tem como finalidade identificar e quantificar seus principais parâmetros onde os seus valores foram alcançados de forma experimental, permitindo compreender a composição do efluente e sua carga poluidora. Essa etapa é de grande importância, pois fornece informações essenciais para entender os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado e definir estratégias de tratamento mais eficientes e sustentáveis. Além disso, conhecer as propriedades físico-químicas da ARC é fundamental para dimensionar corretamente unidades de tratamento, como decantadores e sistemas biológicos, garantindo eficiência operacional e atendimento às legislações ambientais vigentes (CARVALHO; OLIVEIRA; MENDONÇA, 2022; RIBEIRO; CARVALHO; PEREIRA, 2021).

No presente estudo, as análises foram conduzidas no Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (LabSan/DEA-CT/UFES) para a obtenção dos parâmetros concentração de sólidos suspensos totais (SST), por meio da série de sólidos, seguindo os protocolos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23ª edição (APHA, 2017) e massa específica da fração sólida da ARC, através do método de picnometria, o que assegurou a confiabilidade dos resultados obtidos e, conseqüentemente, a qualidade dos parâmetros utilizados no dimensionamento do sistema de tratamento da ARC.

### 3.3.1. Determinação da série de sólidos

A análise da série de sólidos compreende a quantificação das frações totais, suspensas, dissolvidas, fixas e voláteis, além do volume de sólidos sedimentáveis.

Figura 4 - Organograma da série de sólidos.



Fonte: O autor (2025).

No entanto, foi analisada apenas a fração de interesse do estudo, que correspondeu à dos SST. Vale ressaltar que este parâmetro avaliado em laboratório foi proveniente da média aritmética de uma duplicata.

#### 3.3.1.1. Sólidos Suspensos Totais

A quantificação dos SST seguiu o método 2540 D (APHA, 2017). Um volume de 25 mL de amostra homogeneizada foi filtrado a vácuo através de um filtro de fibra de vidro (porosidade de 1,5 µm) seca e de peso previamente aferido e constante. O filtro com o material retido foi lavado com água destilada para remover os sólidos dissolvidos e, então, seco em estufa a 103-105 °C até atingir peso constante. A concentração de SST foi determinada pela Equação 1:

$$SST = \frac{(M_{filtro,final} - M_{filtro,inicial}) * 1.000.000}{V_{amostra}} \quad (1)$$

em que,  $M_{filtro,final}$  representa a massa do filtro com o resíduo suspenso seco (mg),  $M_{filtro,inicial}$  a massa do filtro seco (mg) e  $V_{amostra}$  o volume da amostra adicionado (L).

### 3.3.2. Massa específica da fração sólida

O procedimento foi iniciado com a preparação da amostra sólida. Foi disposto um volume de 1200 mL de ARC em 06 (seis) cadinhos, 200 mL em cada, que foram então submetidos à secagem controlada. A secagem ocorreu em uma estufa, com a temperatura mantida entre 105°C e 110°C, por um período de 4 dias (96 horas). Esse tempo foi suficiente para garantir a remoção total da água livre, deixando apenas a fração sólida. Após a secagem, os cadinhos foram retirados da estufa e resfriados em dessecador até atingir a temperatura ambiente.

A determinação da massa específica foi realizada em um picnômetro, aparato especializado que permite determinar a densidade de líquidos e sólidos. O modelo utilizado foi o AUTODENSITY 200/N, série 018022091155 da APC Instruments. Antes de iniciar a medição, o picnômetro foi cuidadosamente limpo e seco para evitar qualquer contaminação que pudesse alterar os resultados. O picnômetro foi então preenchido com a fração sólida seca, garantindo que a quantidade de material fosse suficiente para uma medição precisa. O processo de medição no picnômetro segue o princípio de Arquimedes, que compara a massa do picnômetro com água e a massa do picnômetro com a amostra sólida. Inicialmente, o picnômetro foi preenchido com água destilada até o nível de marcação, e a massa total (picnômetro + água) foi medida. Depois, a fração sólida foi transferida cuidadosamente para o picnômetro, que foi completado novamente com água destilada até o nível de marcação. A massa total do picnômetro contendo a amostra sólida e a água foi registrada.

Com os dados de massa obtidos, a massa específica da fração sólida foi calculada a partir da diferença no volume de água deslocado. Para tanto, foi utilizada a Equação 2.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2)$$

em que,  $\rho_s$  representa a massa específica da fração sólida (g/cm<sup>3</sup>),  $m_s$  a massa da amostra sólida (g) e  $V_s$  o volume da fração sólida, obtido pela diferença de volume entre o picnômetro cheio com água e o picnômetro contendo a amostra sólida (cm<sup>3</sup>).

### 3.4. DIMENSIONAMENTO DO SEDIMENTADOR

O método de Kynch (1952) é amplamente empregado em projetos de unidades de sedimentação, pois permite relacionar as características da suspensão com a definição das dimensões do equipamento. Para isso, utiliza como parâmetros principais a massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), a velocidade de sedimentação da suspensão ( $v_s$ ), a concentração de sólidos na alimentação ( $C_{sA}$ ) e a concentração de sólidos no fundo do sedimentador ( $C_{sL}$ ), além da geometria da unidade a ser projetada. Em conjunto, esses dados permitem prever o comportamento da suspensão durante a sedimentação, determinar a área mínima necessária do sedimentador para garantir a clarificação adequada e calcular a altura da zona de compressão de lodo. Dessa forma, cada parâmetro obtido de forma experimental e/ou por meio de cálculos complementares, é integrado no modelo, possibilitando, assim, estabelecer as dimensões finais da estrutura, garantindo eficiência na separação da fração sólida da ARC. Ademais, partindo do diâmetro obtido e da área calculada, é possível adotar uma abordagem mais segura para o projeto. Assim, a literatura técnica, incluindo trabalhos como o de Richards (1998) em "Manejo de Lodo e Resíduos Sólidos", recomenda um aumento de 10% sobre a área calculada. Esse acréscimo serve como uma margem de segurança para compensar eventuais variações de vazão ou incertezas no processo, garantindo a eficiência do tratamento e a qualidade do efluente final. Com o aumento percentual feito no valor da área, foi obtido um novo diâmetro, onde, para fins práticos e de construção, foi feito um arredondamento desse valor calculado. Essa ação não apenas simplifica a execução do projeto, mas também oferece uma margem de segurança ainda maior, alinhando a teoria com a prática de engenharia.

#### 3.4.1. Velocidade de sedimentação

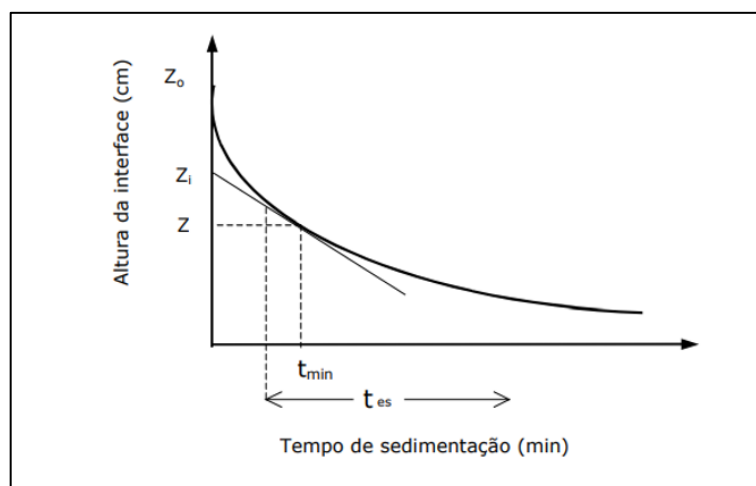
A determinação da taxa de sedimentação é um passo fundamental no dimensionamento do sedimentador, pois permite compreender como a fração sólida da ARC se comporta ao longo do tempo sob ação da gravidade. Esse parâmetro, obtido experimentalmente pelo método de Kynch (1952), também conhecido como método simplificado das tangentes, onde por meio de um único ensaio de proveta, fornece a velocidade média com que as partículas migram em direção ao fundo do

recipiente, o que reflete diretamente na eficiência do processo de clarificação. Este procedimento facilita a definição gráfica da variável de projeto que corresponde à velocidade de sedimentação, que é definida pela Equação 3. Essa equação permite calcular a velocidade de sedimentação de sólidos em diferentes alturas da proveta durante o ensaio de sedimentação.

$$v_s = \frac{z_i - z}{t_{min}} \quad (3)$$

em que,  $v_s$  representa velocidade de sedimentação (cm/min),  $z_0$  a altura inicial da suspensão (cm),  $z_i$  o ponto no qual a tangente toca o eixo y (cm),  $z$  a altura da interface (cm) e  $t$ : tempo até atingir a altura da interface em análise (min).

Figura 9 - Determinação das variáveis de projeto pelo Método de Kynch simplificado.



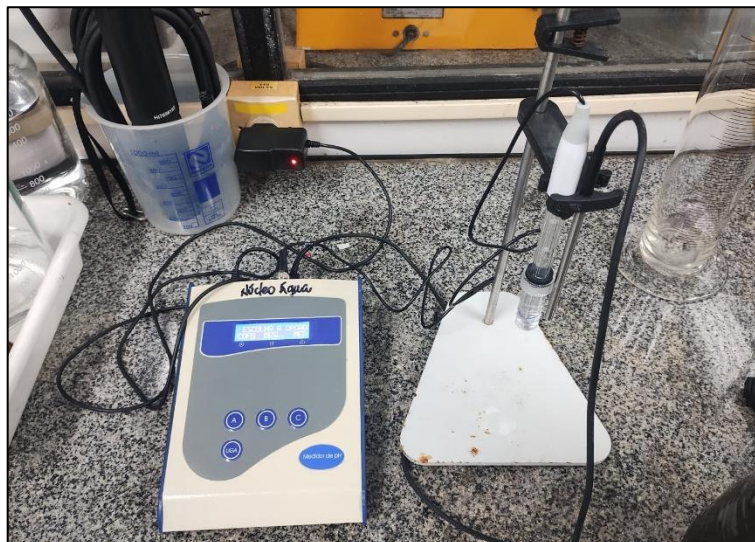
Fonte: CETEM/MCT (2007).

Para a análise deste parâmetro, foi utilizada 01 (uma) proveta graduada de 1000 mL, 01 (um) cronômetro digital e uma tabela para preenchimento dos dados da medição. A análise foi realizada durante um período de 60 (sessenta) minutos, com marcação da altura da camada dos sólidos sedimentáveis em um intervalo de tempo pré-estabelecido, sendo a cada 05 (cinco) minutos.

Antes de dar início ao experimento, foi feita a aferição da temperatura através de um termômetro digital.



Figura 5 - Termômetro digital utilizado na aferição da temperatura da amostra de ARC.



Fonte: O autor (2025).

Logo após, para realização da análise, a amostra presente no recipiente plástico foi homogeneizada manualmente através de sucessivas inversões, garantindo que o conteúdo estivesse bem misturado e, após esse processo, foi retirada uma alíquota de 1000 mL da amostra, a qual foi disposta diretamente na proveta de mesmo volume em uma bancada plana e sem vibrações.

Figura 6 - Amostra da ARC armazenada em recipiente hermético de polietileno de 2 L após ser homogeneizada.



Fonte: O autor (2025).

Figura 7 - Proveta graduada de 1000 mL e cronômetro digital utilizados no ensaio da taxa de sedimentação.



Fonte: O autor (2025).

Quanto à graduação volumétrica (mL) da proveta, é válido ressaltar que esta foi convertida em comprimento (cm) posteriormente, para o cálculo da velocidade de sedimentação. Para tanto, foi utilizado um paquímetro para obtenção do diâmetro interno com precisão milimétrica. Assim, a partir deste valor foi possível chegar à altura ( $z_0 = h$ ) em questão, por meio da Equação 4, a qual corresponde ao volume de um prisma cilíndrico.

$$V_c = \pi R^2 h \quad (4)$$

Isolando a altura (h), tem-se:

$$h = \frac{V_c}{\pi R^2} \quad (5)$$

No entanto, como foi obtido o diâmetro (D) em vez do raio (R), sendo  $R = D/2$ , a Equação 5 fica da seguinte forma:

$$h = \frac{V_c}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (6)$$

Com a altura obtida em cada ponto através da Equação 6, a medição foi iniciada com a amostra na altura  $z_0$  e à medida que o tempo passava e as partículas mais densas se sedimentavam, foram anotadas as alturas correspondentes ao intervalo de 5 minutos até completar o período de 60 minutos.

### 3.4.2. Área do sedimentador

O dimensionamento correto da área do sedimentador é essencial para garantir a eficiência da separação de sólidos, pois a área determina o tempo disponível para sedimentação das partículas. Cremasco (2012) ressalta que áreas subdimensionadas comprometem a clarificação, enquanto áreas superdimensionadas elevam custos sem ganhos significativos. No tratamento da ARC, esse cuidado evita falhas operacionais e assegura maior eficiência nas etapas subsequentes. Assim, segundo o autor supracitado, considerando o sedimentador contínuo em operação, o balanço de massa (volumétrico) para as fases particulada e líquida pode ser representado pelas equações de balanço de massa da fase particulada (7) e de balanço de massa da fase líquida (8), respectivamente.

$$Q_A \varepsilon_{p_A} = Q_i \varepsilon_{p_i} = Q_L \varepsilon_{p_L} \quad (7)$$

Onde  $Q$  é a vazão volumétrica;  $\varepsilon_p$  fração volumétrica de particulados, proveniente da Equação  $\varepsilon_p = \bar{\rho}_p / \rho_p$ , em que  $\bar{\rho}_p$  é a concentração mássica da fase particulada e  $\rho_p$  é a massa específica das partículas contidas nessa fase. Quanto aos subscritos A, i e L, referem-se, respectivamente, à alimentação, camada limitante e lama (lodo espessado).

$$Q_E + Q_L(1 - \varepsilon_{p_L}) = Q_i(1 - \varepsilon_{p_i}) \quad (8)$$

Onde  $Q_E$  é a vazão volumétrica ascendente extravasante do líquido. Do arranjo das equações 7 e 8, tem-se:

$$Q_E = Q_i \varepsilon_{p_i} \left( \frac{1}{\varepsilon_{p_i}} - \frac{1}{\varepsilon_{p_L}} \right) \quad (9)$$

Identificando a Equação 7 na Equação 9, está é retomada da seguinte forma:

$$Q_E = Q_A \varepsilon_{pA} \left( \frac{1}{\varepsilon_{p_i}} - \frac{1}{\varepsilon_{p_L}} \right) \quad (10)$$

Dividindo a Equação 8 pela área transversal do sedimentador (*Área*) e considerando-se que a velocidade ascensional de líquido possa ser expressa pela Equação 11.

$$q_E = \frac{Q_E}{\text{Área}} \quad (11)$$

Pode-se escrever a Equação 9 em termos dessa velocidade ascendente do líquido por meio da Equação 12.

$$q_E = \frac{Q_E}{\text{Área}} = \frac{Q_A}{\text{Área}} \varepsilon_{pA} \left( \frac{1}{\varepsilon_{p_i}} - \frac{1}{\varepsilon_{p_L}} \right) \quad (12)$$

De acordo com d'Ávila (1982), considera-se que o valor da velocidade ascensional do líquido deve ser menor ou máximo igual ao da velocidade de sedimentação  $q_i$ , para que não haja particulados no extravasante, sendo possível escrever:

$$q_i = q_E \quad (13)$$

Substituindo a Equação 13 na Equação 12, obtém-se a Equação 14.

$$q_i = \frac{Q_A}{\text{Área}} \varepsilon_{pA} \left( \frac{1}{\varepsilon_{p_i}} - \frac{1}{\varepsilon_{p_L}} \right) \quad (14)$$

Permitindo explicar a capacidade do sedimentador e sua área, respectivamente, segundo

$$\frac{Q_A}{\text{Área}} = \frac{q_i}{\varepsilon_{pA}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{p_i}} - \frac{1}{\varepsilon_{p_L}} \right)^{-1} \quad (15)$$

Ou

$$\text{Área} = \frac{Q_A \varepsilon_{pA}}{q_i} \left( \frac{1}{\varepsilon_{p_i}} - \frac{1}{\varepsilon_{p_L}} \right) \quad (16)$$

Para obter  $q_i$  e  $z_i$ , traça-se, na curva de sedimentação obtida, para cada par (z, t), uma reta tangente ( $f(x) = ax + b$ ) a cada par de ponto, onde são obtidos os seus respectivos valores. Assim,  $q_i$  e  $z_i$  são correspondentes, respectivamente, aos

coeficientes angular ( $a$ ) e linear ( $b$ ) da reta. É válido ressaltar que  $q_i$  trata-se da velocidade de sedimentação em cada intervalo, onde também foi determinado o seu valor em m/s.

Quanto aos valores das frações volumétricas de particulados na alimentação ( $\varepsilon_{p_A}$ ), da lama final ( $\varepsilon_{p_L}$ ) e em cada ponto de medição ( $\varepsilon_{p_i}$ ), estes foram obtidos com base no valor da concentração de SST obtida na série de sólidos, os quais são definidos como:

$$\varepsilon_{p_A} = \frac{C_{sA}}{\rho_s} \quad (17)$$

Onde  $C_{sA}$  corresponde à concentração comum da amostra de ARC (g/cm<sup>3</sup>) e  $\rho_s$  à massa específica da fração de sólidos (g/cm<sup>3</sup>).

Para  $\varepsilon_{p_A}$ , a concentração comum da amostra ( $C_{sA}$ ) é obtida através da razão entre a massa da concentração de sólidos suspensos totais ( $m_{SST}$ ) e o volume da amostra ( $V_A$ ).

$$C_{sA} = \frac{m_{SST}}{V_A} \quad (18)$$

Quanto a  $\varepsilon_{p_L}$ , é definida como:

$$\varepsilon_{p_L} = \frac{C_{sL}}{\rho_s} \quad (19)$$

Sendo  $C_{sL}$  a concentração comum da lama presente na amostra de ARC (g/cm<sup>3</sup>).

Para  $\varepsilon_{p_L}$ , para o valor da concentração comum da lama gerada ( $C_{sL}$ ), é utilizada a razão entre a massa da concentração de sólidos suspensos totais ( $m_{SST}$ ) e o volume da fração sólida espessada da amostra ( $V_L$ ), volume este verificado ao fim do ensaio de sedimentação.

$$C_{sL} = \frac{m_{SST}}{V_L} \quad (20)$$

Por fim, a parcela  $\varepsilon_{p_i}$  é definida como:

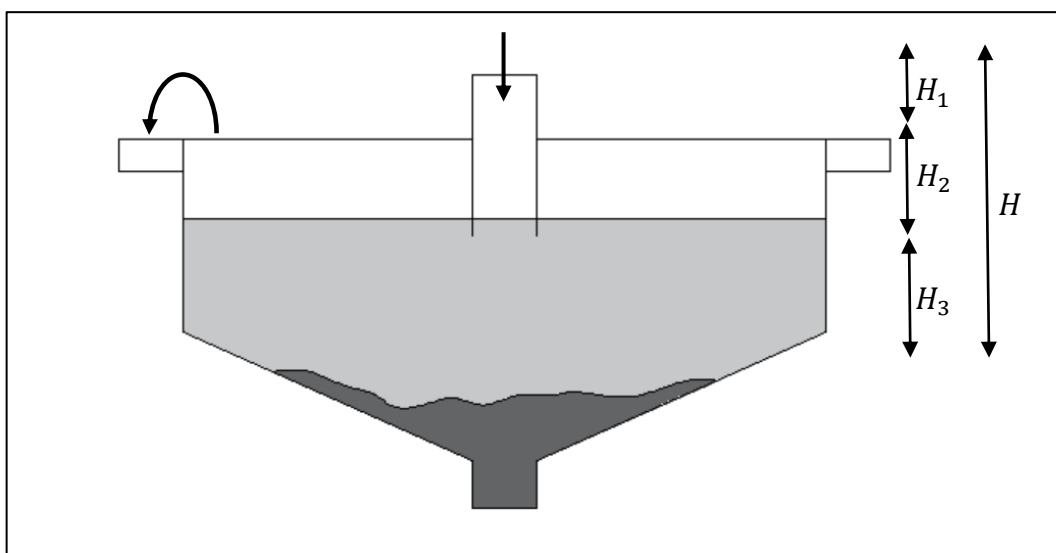
$$\varepsilon_{p_i} = \varepsilon_{p_A} \frac{z_0}{z_i} \quad (21)$$

Onde  $z_0$  representa a altura inicial da fração de sólidos (cm) e  $z_i$  a altura em cada ponto de medição (cm).

### 3.4.3. Altura do sedimentador

O dimensionamento da altura do sedimentador ( $H$ ), conforme Pavlov *et al.* (1981), é importante porque garante o tempo de residência necessário para a compactação e adensamento do lodo, evitando tanto a perda de sólidos no efluente clarificado quanto o acúmulo excessivo no fundo do equipamento. Desta forma, a altura do sedimentador ( $H$ ) foi obtida por meio do cálculo proposto pelo autor supracitado, no qual é considerado a soma das parcelas indicadas na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de alturas de um sedimentador.



Fonte: Adaptado de FRANÇA e MASSARANI (2004).

Sendo:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 \quad (22)$$

em que,  $H_1$  representa a altura da região de líquido clarificado (m),  $H_2$  a altura da região de espessamento (m) e  $H_3$  a altura do fundo do sedimentador (m).

A altura  $H_1$  pode variar entre 0,45 e 0,75 m. Já a altura da região de espessamento ( $H_2$ ) foi estimada através da Equação 23 (ORR, 1966):

$$H_2 = \frac{4}{3} z_{min} \left( \frac{t_R}{t_{min}} \right) \quad (23)$$

em que,  $z_{min}$  representa altura mínima (cm) para sedimentação,  $t_R$  o tempo de residência da fase particulada na região de compactação (min) e  $t_{min}$  o tempo mínimo (min) para sedimentação.

É válido destacar que o inconveniente do método de Kynch está na necessidade de explorar a curva de sedimentação, na região de transição, para alcançar o máximo valor para a área do sedimentador. Desta forma, Biscaia Jr. (1982) propôs uma simplificação ao procedimento de Kynch e à minimização de  $Q_A/\text{Área}$ , com base no fato de que a curva de sedimentação é resultado da combinação de uma reta com uma exponencial (MASSARANI, 1997), ou

$$\left( \frac{Q}{\text{Área}} \right)_{proj.} = \frac{z_0}{t_{min}} \quad (24)$$

Onde o valor de  $z_{min}$  corresponde a

$$z_{min} = z_0 \frac{\varepsilon_{ps}}{\varepsilon_{pL}} \quad (25)$$

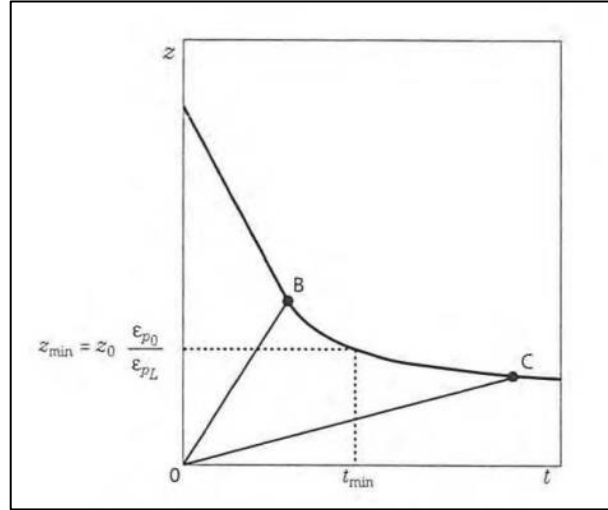
E  $t_{min}$ :

$$t_{min} = \frac{z_0 * \text{Área}}{Q} \quad (26)$$

Para estimar o valor de  $t_R$ , Pavlov *et al.* (1981) sugerem a realização de inspeção da tabela contendo as medições obtidas no experimento feito pela metodologia de Kynch, buscando verificar o tempo até o qual a concentração é constante e a partir de qual momento ela começa a variar. Desta maneira, assume-se que ao final do período de sedimentação a velocidade constante está entre o tempo mencionado e o posterior a ele. Para tanto, tomou-se o valor médio, realizando uma média aritmética simples. Na sequência, considerando o valor de  $\varepsilon_{pL}$  de projeto, também foi verificado o período de

tempo no qual a concentração estava situada, onde também foi utilizado a média dos valores correspondentes ao intervalo analisado.

Figura 9 - Simplificação de Biscaia Jr.



Fonte: CREMASCO (2012).

Para  $H_3$ , foi utilizada a Equação 27.

$$H_3 = 0,073 * D \quad (27)$$

Desta forma, tendo em vista que a área de um círculo é apresentada pela Equação 28, é preciso isolar o termo referente ao diâmetro ( $D$ ) em cm.

$$\text{Área}_c = \pi R^2 \quad (28)$$

No entanto, sabemos que  $D = 2R$ , ou seja,  $R = D/2$ . Logo, temos:

$$\text{Área}_c = \pi \frac{D^2}{4} \quad (29)$$

Isolando o  $D$ , tem-se:

$$D = \sqrt{\frac{4\text{Área}_c}{\pi}} \quad (30)$$



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. SÉRIE DE SÓLIDOS

A análise da amostra de ARC apresentou uma concentração de sólidos suspensos totais (SST) de 12.150 mg/L. Esse valor, apesar de ser superior aos reportados em estudos de Prezotti *et al.* (2012) e Silva, Andrade e Ferreira (2019), que indicam concentrações entre 2.500 e 4.000 mg/L, não compromete a validade da análise. A diferença se deve, principalmente, à variabilidade da composição da ARC, um fator bem documentado e discutido neste trabalho.

A Tabela 2, que compara o resultado deste trabalho com dados de outras referências, como as de Matos *et al.* (2015) e Campos *et al.* (2010), ilustra claramente essa variabilidade. Enquanto este estudo obteve um valor de 12.150 mg/L, os valores de referência variam de 245 a 2.311 mg/L. Essa ampla faixa de valores entre as diferentes UP's é um reflexo das particularidades de cada processo. Fatores como a tecnologia empregada no processamento do café, a eficiência da etapa de despolpa, a quantidade de cerejas imaturos, a mucilagem extraída e a proporção de cascas e polpa que acabam na água de lavagem, influenciam diretamente a concentração de SST na ARC (Prezotti *et al.*, 2012).

Tabela 2 - Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e exemplos da literatura (mg/L).

Parâmetro	Valores encontrados	MATOS <i>et al.</i> , 2015	CAMPOS <i>et al.</i> , 2010
SST	12.150	245 - 903	469 - 2.311

Fonte: O autor (2025).

Portanto, o valor de SST obtido neste trabalho é um dado representativo das condições específicas da unidade de processamento de onde a amostra foi coletada, confirmando a validade da metodologia empregada. A variabilidade observada ressalta que a ARC não possui uma composição fixa, mas sim uma natureza dinamicamente mutável, o que reforça a necessidade de caracterização para cada local.

#### 4.2. MASSA ESPECÍFICA DA FRAÇÃO SÓLIDA

A massa específica (densidade) da fração sólida da ARC, obtida via picnometria e igual a  $1,366 \text{ g/cm}^3$ , está dentro de um intervalo plausível, especialmente considerando a elevada concentração de matéria orgânica presente neste efluente. Esse valor, superior ao da água ( $1,00 \text{ g/cm}^3$ ), reflete sua elevada concentração de matéria orgânica (MO) presente no lodo, referente a sólidos densos, como mucilagem, fibras e casca, típicos da ARC.

Em comparação à densidade de muitos resíduos orgânicos comuns – por exemplo, lodos de laticínios ou compostos formados por resíduos vegetais, que tipicamente variam entre  $0,5$  a  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , como observado em compostos de bagaço de papel ou palhas (Zawadzińska et al., 2022), bem como lodos ativados convencionais – como aqueles gerados em estações de tratamento de efluentes domésticos, que apresentam densidades entre  $1,002$  e  $1,040 \text{ g/cm}^3$  (SCHULER, Andrew J., 2007), a ARC apresenta densidade consideravelmente maior com relação aos exemplos supracitados.

Em particular, o lodo gerado durante o processamento úmido de café possui alta proporção de sólidos (mucilagem, casca, fibras, etc.), o que naturalmente eleva sua massa específica. Embora a literatura não ofereça muitos valores diretos para comparação com o lodo de ARC, estudos sobre resíduos envolvendo alta carga de sólidos reportam densidades mais elevadas justamente quando compostos de substâncias densas, como lignina e fibras, estão presentes (Kumar, V., Verma, P., de Freitas, FA et al., 2025). Assim, o valor de  $1,366 \text{ g/cm}^3$  pode ser considerado esperado e coerente, refletindo a composição concentrada desses sólidos na ARC e reforçando a qualidade dos dados obtidos experimentalmente.

#### 4.3. VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO

Inicialmente, a aferição da temperatura da amostra utilizada no experimento, através de um termômetro digital antes de iniciar o procedimento, indicou  $24,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dando início ao ensaio, foram obtidas as medições do tempo e do volume, assim como é apresentado na Tabela 3.

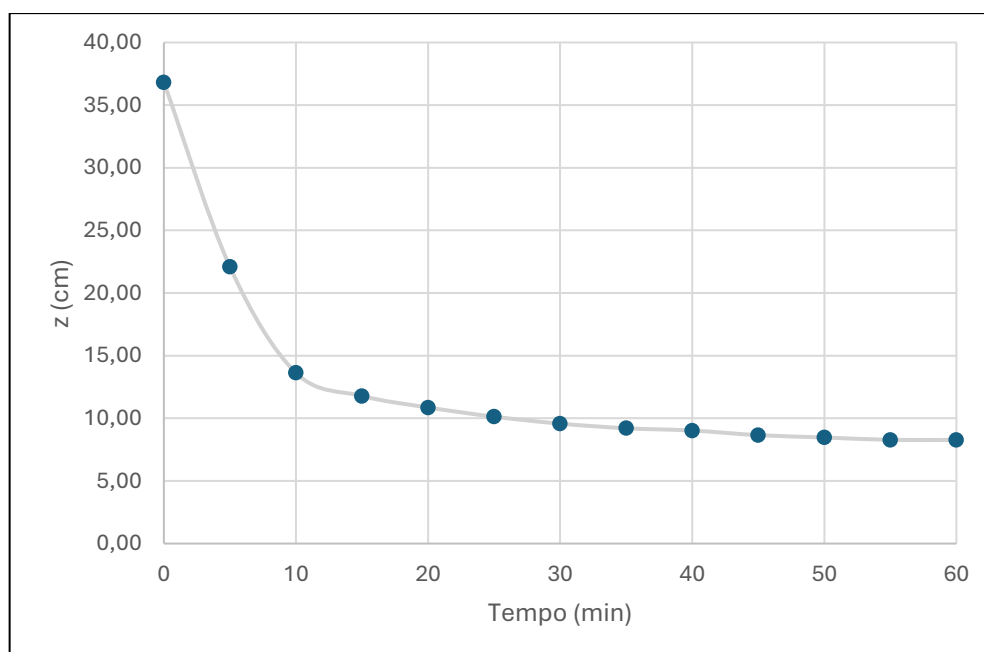
Tabela 3 - Medições obtidas no ensaio de sedimentação.

t (min)	z (mL)
0	1000
5	600
10	370
15	320
20	295
25	275
30	260
35	250
40	245
45	235
50	230
55	225
60	225

Fonte: O autor (2025).

Os valores das medições anotadas foram usados para construir o gráfico da curva de sedimentação, como é apresentada na Figura 10.

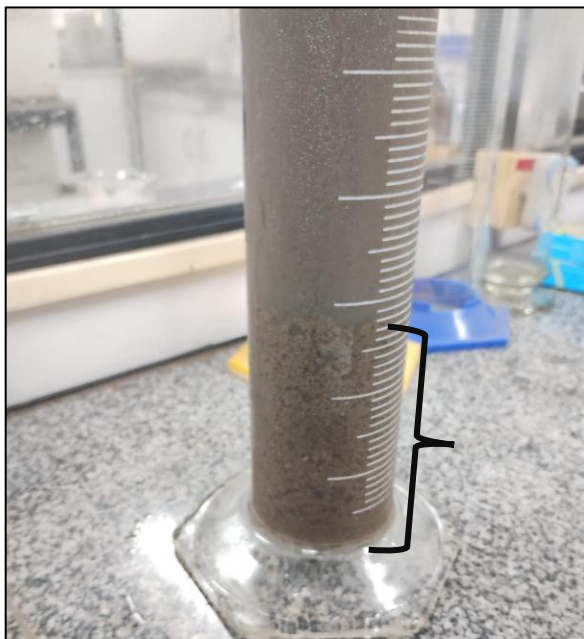
Figura 10 - Curva de sedimentação obtida no ensaio pelo método de Kynch (1952).



Fonte: O autor (2025).

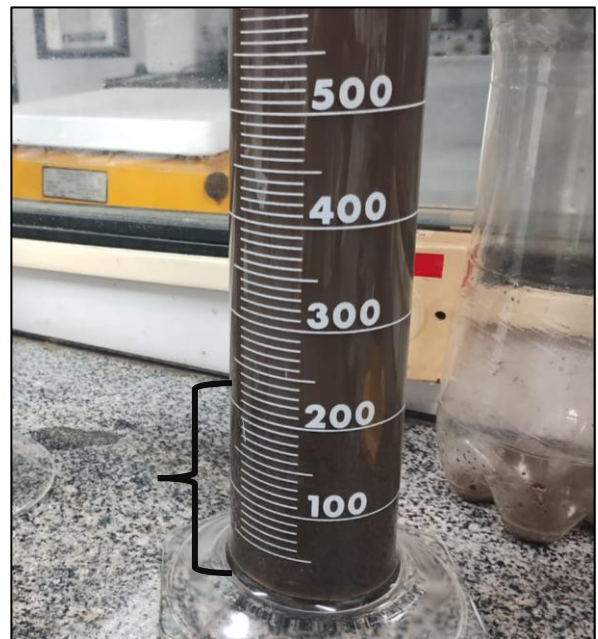
Com 20 minutos de ensaio, quando a maioria das partículas já haviam sedimentado e passou a ocorrer apenas o empacotamento do leito de sólidos no fundo da proveta, foi possível observar que a variação de altura da interface ocorreu muito lentamente, isto é, a diferença entre o fundo da proveta e a marcação da altura da polpa da ARC (ver Figuras 10, 11 e 12). A altura da graduação da proveta na região do espessamento permaneceu estável na faixa de aproximadamente 8,28 cm, havendo posteriormente apenas variações sutis até o fim do período da análise.

Figura 11 - Variação da interface de espessamento da ARC aos 25 min.



Fonte: O autor (2025).

Figura 12 - Variação da interface de espessamento da ARC aos 60 min.



Fonte: O autor (2025).

Por meio da análise da Figura 10, foi possível observar que, a partir de  $t = 10$ , a variação de altura da interface ocorreu de forma lenta, indicando a estabilização no valor da altura da região de compactação de sólidos devido à pequena variação até o fim do período do experimento.

Em sequência, para calcular as velocidades em cada ponto da medição, foi transformado o volume (mL) em comprimento (cm). Assim, uma vez que 1000 mL equivale à  $1000 \text{ cm}^3$ , e tendo o diâmetro medido igual a 5,88 cm, chegou-se à altura em questão ( $h = z$ ):

$$h = \frac{1000}{\pi \frac{(5,88)^2}{4}}$$

$$h = 36,8260 \cong 36,83 \text{ cm}$$

Com isso, foram obtidos os valores presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Conversão de volume (mL) para altura (cm) dos valores das medições obtidas no ensaio de sedimentação.

$t$ (min)	$z$ (mL)	$z$ (cm)
0	1000	36,83
5	600	22,10
10	370	13,63
15	320	11,78
20	295	10,86
25	275	10,13
30	260	9,57
35	250	9,21
40	245	9,02
45	235	8,65
50	230	8,47
55	225	8,28
60	225	8,28

Fonte: O autor (2025).

Em seguida, para cada par de ponto, foram obtidos os valores de  $q_i$  e  $z_i$ , além de  $q_i$  em m/s ( $v$ ).

Tabela 5 - Valores calculados a partir de dados obtidos por meio do ensaio de proveta.

$z_i$ (cm)	$q_i$ (cm/min)	$v$ (m/s)
36,83	2,95	0,000491
36,83	2,95	0,000491
30,57	1,69	0,000282
17,31	0,37	0,000061
14,55	0,18	0,000031
13,81	0,15	0,000025
12,89	0,11	0,000018
11,78	0,07	0,000012
10,50	0,04	0,000006
11,97	0,07	0,000012
10,31	0,04	0,000006
10,37	0,04	0,000006
8,10	0,02	0,000003

Fonte: O autor (2025).

#### 4.4. DIMENSIONAMENTO DO SEDIMENTADOR

##### 4.4.1. Área

Quanto a  $\rho_s$ ,  $C_{sA}$ ,  $C_{sL}$ ,  $\varepsilon_{pL}$  e  $\varepsilon_{pA}$ , os valores obtidos foram apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados no dimensionamento do sedimentador.

Parâmetros	Valor	Unidade de medida
Concentração de SST	12.150	mg/L
Vazão de alimentação da ARC ( $Q_A$ )	9.000	L/h
Massa específica da fração sólida ( $\rho_s$ )	1,366	g/cm <sup>3</sup>
Concentração comum da amostra ( $C_{sA}$ )	0,01215	g/cm <sup>3</sup>
Concentração comum da lama ( $C_{sL}$ )	0,05400	g/cm <sup>3</sup>
Valor da fração volumétrica de particulados na alimentação ( $\varepsilon_{pA}$ )	0,0089	-
Valor da fração volumétrica de particulados da lama ( $\varepsilon_{pL}$ )	0,0395	-

Fonte: O autor (2025).

Os valores das frações volumétricas de particulados na alimentação ( $\varepsilon_{pA}$ ), da lama final ( $\varepsilon_{pL}$ ) e em cada ponto de medição ( $\varepsilon_{pi}$ ) estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Fração de sólidos calculada em cada altura da proveta.

$t$ (min)	$z$ (cm)	$\varepsilon_{pi}$
0	36,83	0,0089
5	22,10	0,0089
10	13,63	0,0107
15	11,78	0,0189
20	10,86	0,0225
25	10,13	0,0237
30	9,57	0,0254
35	9,21	0,0278
40	9,02	0,0312
45	8,65	0,0274
50	8,47	0,0318
55	8,28	0,0316
60	8,28	0,0125

Fonte: Autoria própria (2025).

Os valores das respectivas áreas e dos diâmetros para cada uma estão representados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores calculados referentes ao dimensionamento do sedimentador.

<b>A (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>D (m)</b>
39453,42	3,95	2,24
39453,42	3,95	2,24
53564,46	5,36	2,61
99759,56	9,98	3,56
138470,75	13,85	4,20
152714,93	15,27	4,41
169627,97	16,96	4,65
193263,01	19,33	4,96
244393,67	24,44	5,58
203431,11	20,34	5,09
224029,84	22,40	5,34
223278,72	22,33	5,33
16745,97	1,67	1,46

Fonte: O autor (2025).

Partindo do diâmetro e da área obtidos, após o aumento de 10% sobre a área calculada, a área do sedimentador passa de 24,44 m<sup>2</sup> para 26,884 m<sup>2</sup>. Com essa nova área, o diâmetro calculado seria de aproximadamente 5,85 m, o qual foi arredondado para 6,0.

A Tabela 9 apresenta os valores calculados e os valores adotados para o projeto em estudo.

Tabela 9 - Valores das dimensões do sedimentador calculadas e adotadas (Fonte: Autoria própria).

<b>Item</b>	<b>Valor calculado</b>	<b>Valor adotado</b>	<b>Unidade de medida</b>
<i>D</i>	5,58	6	m
<i>Área<sub>d</sub></i>	24,44	26,884	m <sup>2</sup>

Fonte: O autor (2025).

Em termos de projeto, as dimensões calculadas são plausíveis quando comparados a uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) ou de Água (ETA) de pequeno porte. Embora a literatura, como a obra de Von Sperling (2005), mencione que grandes

decantadores podem ter diâmetros superiores a 20 m, a dimensão do projeto é consistente para aplicações de menor vazão, como é o caso.

#### 4.4.2. Alturas

Com relação às alturas do sedimentador, para  $H_1$  foi adotado o valor máximo disponível no método proposto, a saber, 0,75 m. A escolha dessa altura buscou proporcionar o aumento do tempo de detenção do efluente, melhorando a remoção de sólidos sedimentáveis. Isso favorece a aglomeração das partículas e a separação eficiente dos sólidos da água, além de permitir a redução da área necessária.

Quanto à  $H_2$ , uma vez que  $z_0 = 36,83 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon_{ps} = 0,0089$  e  $\varepsilon_{pL} = 0,0395$ , foi obtido  $z_{min.} = 8,29 \text{ cm}$ .

$$z_{min} = 36,83 \frac{0,0089}{0,0395}$$

$$z_{min} = 8,29 \text{ cm}$$

Para  $t_R$ , por meio da Tabela 8, foi verificado que a velocidade é constante até  $t = 5$  e varia a partir de  $t = 10 \text{ min}$ . Dessa maneira, assumiu-se que ao final do período de sedimentação a velocidade constante está entre 5 e 10 minutos. Para tanto, o valor médio tomado foi de 12,5 min. Posteriormente, foi verificado que a fração de sólidos de projeto, igual a  $\varepsilon_{pL} = 0,0126$ , está situada entre os tempos 40 min e 45 min, observação esta feita através da análise da Figura 10. Assim, assumiu-se o tempo médio igual a 42,5 min. Com isso:

$$t_R = 42,5 - 12,5 = 30 \text{ min}$$

Para  $t_{min}$ , foi calculado o seguinte valor:

$$t_{min} = \frac{36,83 * 244.393,67}{150.000}$$

$$t_{min} \cong 60 \text{ min}$$

Assim, temos:

$$H_2 = \frac{4}{3} 8,29 \left( \frac{35}{60} \right)$$

$$H_2 \cong 7,8 \text{ cm}$$

$$H_2 = 0,078 \text{ m}$$



Para  $H_3$ , foi encontrado o valor de  $D = 5,58 \text{ m}$ .

$$D = \sqrt{\frac{4 * 244.393,67}{\pi}}$$

$$D \cong 5,58 \text{ m}$$

Desta forma, foi calculado o valor de  $H_3$  sendo igual a 0,41 m.

$$H_3 = 0,073 * 5,58$$

$$H_3 = 0,407214 \text{ m}$$

$$H_3 \cong 0,41 \text{ m}$$

A Tabela 10 apresenta os valores calculados, corrigidos com o acréscimo de 10 % e os valores adotados.

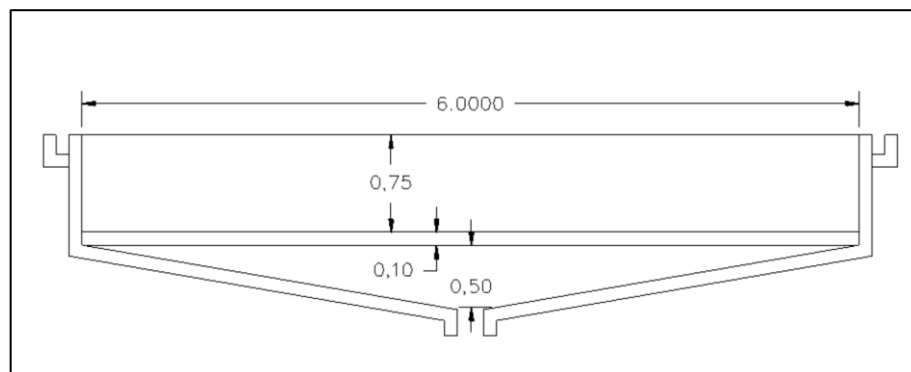
Tabela 10 - Valores das alturas do sedimentador calculadas e adotadas

Alturas	Valor calculado	Valor corrigido	Valor adotado	Unidade de medida
$H_1$	(0,75)	(0,75)	0,75	m
$H_2$	0,078	0,09	0,10	m
$H_3$	0,407	0,45	0,50	m
$H$	1,24	1,28	1,35	m

Fonte: O autor (2025).

A Figura 13 apresenta a estrutura dimensionada com a indicação das alturas adotadas presentes na Tabela 10.

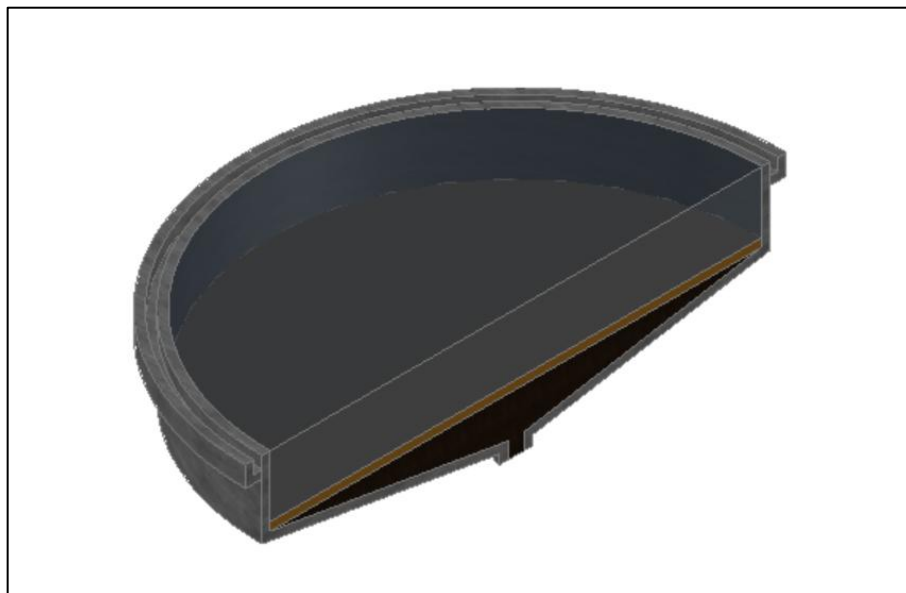
Figura 13 - Corte transversal do decantador com a indicação das alturas calculadas (em metros).



Fonte: O autor (2025).

A Figura 14 apresenta o decantador tridimensionalmente, indicando visualmente as alturas de cada zona supracitada da estrutura em questão.

Figura 14 - Representação do corte transversal tridimensional do decantador, com a indicação das alturas de cada zona da estrutura (sem escala).



Fonte: O autor (2025).

A análise dos valores das alturas calculadas e adotadas para o sedimentador, presentes na Tabela 10, demonstra uma metodologia de projeto robusta e alinhada com as práticas adotadas em literaturas. A transição dos valores calculados para os valores corrigidos, com um acréscimo de 10%, seguida pelo arredondamento nos valores adotados, é uma abordagem padrão para incorporar um fator de segurança ao projeto. Essa prática é essencial para garantir que o sistema tenha capacidade de absorver variações operacionais e facilitar o processo construtivo.

A altura total adotada de 1,35 m, embora seja viável para unidades processadoras de café de menor porte, apresenta-se como significativamente inferior às recomendações de algumas referências existentes. Por exemplo, Von Sperling (2017) sugere profundidades de 3 a 5 m para decantadores tradicionais, enquanto a ABNT NBR 12.209 (1992) recomenda profundidades úteis mínimas de 0,50 m para tanques de sedimentação convencional. Esses valores indicam que, apesar da adequação prática do projeto, ele está estruturado em bases mais compactas ou moduladas.

Desta forma, essa diferença dimensional exige atenção operacional quanto à altura útil relativamente reduzida, onde o acúmulo contínuo de lodo de fundo pode reduzir progressivamente a profundidade eficaz disponível, comprometendo a eficiência esperada do sistema. Dessa forma, é altamente recomendável prever o descarte de lodo de fundo de forma contínua ou em intervalos curtos, garantindo, assim, a manutenção da altura útil e preservando a eficiência hidráulica ao longo do tempo.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou uma nova abordagem para o dimensionamento de um sedimentador aplicado ao tratamento da ARC, buscando promover sua clarificação, fundamentada em parâmetros cujos valores foram obtidos experimentalmente em laboratório. Essa estratégia pode mostrar-se capaz de superar as limitações dos métodos convencionais, que frequentemente se apoiam em coeficientes médios de literatura e, conseqüentemente, podem falhar em representar a elevada variabilidade físico-química característica da ARC. Ao utilizar dados reais do comportamento do efluente, como a concentração de sólidos, a massa específica da fração sólida e a taxa de sedimentação, foi possível propor dimensões que refletem de forma mais fiel as condições do efluente em estudo, proporcionando maior precisão e confiabilidade no dimensionamento do sistema.

O dimensionamento resultante – com área superficial de 26,88 m<sup>2</sup> (diâmetro de 6 m) e altura total de 1,35 m, distribuída em zonas operacionais referentes, respectivamente, à altura da região de líquido clarificado, ( $H_1 = 0,75$  m), altura da região de espessamento ( $H_2 = 0,10$  m), e altura do fundo do sedimentador, referente à zona de lodo ( $H_3 = 0,45$  m) – evidencia a adequação da metodologia em traduzir dados experimentais em parâmetros de projeto coerentes. Esse resultado se distancia de práticas tradicionais, que poderiam conduzir a sistemas subdimensionados, incapazes de garantir a qualidade do efluente final, ou superdimensionados, com impactos negativos sobre os custos de implantação e operação. Dessa forma, essa abordagem considerando o comportamento real do efluente demonstrou-se essencial para aliar eficiência técnica e viabilidade econômica, características indispensáveis em projetos voltados para a sustentabilidade da cafeicultura.

Além do rigor técnico, destaca-se a relevância ambiental e produtiva do sistema proposto. A remoção eficiente dos sólidos suspensos contribui para a redução dos impactos da disposição inadequada da ARC, ao mesmo tempo em que viabiliza seu aproveitamento na fertirrigação, alinhado aos princípios da economia circular. A utilização de efluentes tratados como biofertilizantes reforça a importância do tratamento como elo estratégico entre a preservação de recursos hídricos e a redução da dependência de insumos químicos, promovendo ganhos ambientais, econômicos e sociais no contexto da agricultura sustentável.

De forma complementar, a clarificação da ARC abre também a possibilidade de reuso do efluente tratado diretamente no próprio processamento do café, por meio de sua recirculação na UP. Essa prática, viabilizada pela remoção dos sólidos suspensos totais, contribui significativamente para a redução da demanda hídrica do processo produtivo, promovendo o uso mais racional da água e fortalecendo o caráter sustentável da metodologia proposta.

Adicionalmente, os sólidos espessados no sedimentador assumem um papel de destaque no fechamento do ciclo de aproveitamento da ARC. Quando destinados à compostagem, esses sólidos podem ser incorporados a outros resíduos agroindustriais, resultando em um composto orgânico estabilizado, rico em matéria orgânica e nutrientes essenciais ao solo. Ademais, a compostagem de resíduos orgânicos pode apresentar-se como um processo eficiente para transformar passivos ambientais em insumos agrícolas de alto valor agregado. Dessa forma, o aproveitamento dos sólidos sedimentados fortalece ainda mais o caráter sustentável da proposta, ampliando o espectro de benefícios ambientais e produtivos decorrentes do tratamento.

Conclui-se, portanto, que ao utilizar métodos consolidados para dimensionar um sistema mais representativo, a metodologia adotada não apenas forneceu um dimensionamento tecnicamente consistente, mas também estabeleceu um modelo prático, replicável e ajustável a diferentes condições de unidades processadoras de café. Essa contribuição metodológica se diferencia pela capacidade de transformar dados laboratoriais em soluções práticas de engenharia, agregando valor científico e tecnológico ao setor.

Por fim, ressalta-se que, embora o uso de parâmetros experimentais represente uma alternativa mais promissora por considerar o comportamento real da ARC, métodos baseados em valores de literatura também desempenham papel relevante. Em situações nas quais não seja possível realizar ensaios laboratoriais, torna-se imprescindível recorrer a dados já publicados em trabalhos anteriores, que também se configuram como fontes confiáveis para o dimensionamento. Assim, ambas as abordagens devem ser compreendidas como complementares, cada qual adequada a diferentes realidades técnicas e operacionais. Recomenda-se que pesquisas futuras avaliem o desempenho em escala real e complementem a proposta com estudos voltados tanto ao reuso da ARC tratada na fertirrigação e no próprio processamento do café, quanto à valorização dos sólidos espessados na compostagem, consolidando a sedimentação como etapa fundamental para a gestão sustentável dos efluentes da cafeicultura.

## **6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O presente trabalho concentrou-se no dimensionamento do sedimentador a partir de parâmetros com valores obtidos em ensaios laboratoriais, utilizando os métodos de Kynch e de Pavlov como base metodológica. No entanto, alguns elementos importantes de um projeto completo de sedimentação, como os canais de entrada e saída e a zona de descarte de lodo, não foram contemplados no escopo da pesquisa. O cálculo detalhado dessas estruturas, embora não estivesse previsto na metodologia adotada, representa um aspecto essencial para o desempenho hidráulico, a estabilidade operacional e a manutenção do sistema.

Este ponto configura-se, portanto, como uma oportunidade de complementação futura deste trabalho, mas que pode ser suprido em investigações posteriores. Ressalta-se que, em projetos de engenharia, o projetista dispõe de diferentes referências técnicas, normas e manuais especializados que podem ser utilizados de forma complementar, desde que coerentes com as características do efluente e com as condições de operação previstas. Assim, trabalhos futuros poderão adotar metodologias alternativas para o dimensionamento da zona de drenagem de lodo, bem como diretrizes consolidadas para o projeto dos canais de entrada e saída, de forma a enriquecer e detalhar o sistema proposto.

Adicionalmente, o desenvolvimento de estudos em escala piloto pode validar os parâmetros aqui definidos em condições reais de operação. Outra frente de investigação promissora consiste em avaliar o comportamento do lodo descartado no sistema, especialmente no que se refere à sua aplicabilidade em processos de compostagem, e analisar a eficiência agrônômica da ARC clarificada utilizada na fertirrigação, contribuindo para soluções mais robustas e alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **ANA disponibiliza encartes sobre evolução da outorga e da cobrança pelo uso da água na última década**. Brasília, 27 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-disponibiliza-encartes-sobre-evolucao-da-outorga-e-da-cobranca-pelo-uso-da-agua-na-ultima-decada>>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021: Informe anual**. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 20 junho. 2025.

ANDREOLI, C. V. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Resíduos sólidos: origem, classificação e legislação**. São Carlos: Rima, 1999.

BISCAIA JR., E. C. **Simplificação matemática do método de Kynch**. Comunicação pessoal, 1982. Apud MASSARANI, G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1997.

CAMPOS, C. M. M.; PRADO, M. A. C.; PEREIRA, E. L. **Caracterização físico-química, bioquímica e energética da água residuária do café processado por via**

**úmida.** Bioscience Journal, Uberlândia, MG, v. 26, n. 4, p. 514–524, 2010. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7129>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CAMPOS, L. A.; PRADO, R. M.; PEREIRA, R. G. **Caracterização físico-química de águas residuárias de processamento de café.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 5, p. 531–538, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa>>. Acesso em: 17 jun. 2025.

CARVALHO, A. L. S.; OLIVEIRA, G. C.; MENDONÇA, L. M. **Processamento úmido de café: contribuições para a qualidade sensorial e sustentabilidade da produção.** Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 53, n. 2, p. 345–356, 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufc.br/revistacienciaagronomica>>. Acesso em: 17 jun. 2025.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café,** Brasília, DF, v. 10, n. 1, jan. 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café,** Brasília, DF, v.12, n. 2, segundo levantamento, maio 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/2o-levantamento-de-cafe-safra-2025/boletim-cafe-maio-2025>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

CONFEA - CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA. **Sucesso das culturas de café e mamão no Espírito Santo depende de manejo racional de água,** Brasília, DF, 23 de junho de 2017. Disponível em: <[https://www.confea.org.br/index.php/sucesso-das-culturas-de-cafe-e-mamao-no-espirito-santo-depender-de-manejo-racional-de-agua?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.confea.org.br/index.php/sucesso-das-culturas-de-cafe-e-mamao-no-espirito-santo-depender-de-manejo-racional-de-agua?utm_source=chatgpt.com)>. Acesso em: 21 de jul. de 2025.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos** / Marco Aurélio Cremasco. São Paulo: Blucher, 2012.

DADI, D. et al. **Composting and co-composting of coffee husk and pulp with source-separated municipal solid waste: a breakthrough in valorization of coffee waste**. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, v. 8, p. 263–277, mar. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40093-019-0256-8>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

DE SOUZA, F. F. G.; SOUZA, L. D. M.; AMARAL, B. C.; LEMOS, D. H.; DE SOUZA, A. R. R.; HENRIQUES, J. A.; GARDIMAN JUNIOR, B. S.; DE SOUZA, M. G. **Caracterização de água residuária do café o potencial poluidor nos corpos d'água do município de Ibatiba-ES**. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 4083–4090, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n1-213. Disponível em: <<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2998>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

EMBRAPA. **Produção de Café Cereja Descascado – Equipamentos e Custo de Processamento**. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/971467/producao-de-cafe-cereja-descascado-equipamentos-e-custo-de-processamento>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

EMBRAPA. **Tecnologias permitem uso racional da água na cafeicultura**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1977444/tecnologias-permitem-uso-racional-da-agua-na-cafeicultura>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

ES BRASIL. **Café, o ouro em grãos do Espírito Santo**. Vitória, 1 jul. 2024. Disponível em: <<https://esbrasil.com.br/cafe-o-ouro-em-graos-do-espirito-santo/>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

ES HOJE. **Vai um cafézinho aí? Cafeicultura capixaba é a 3ª maior do mundo**. Vitória, 2023. Disponível em: <<https://eshoje.com.br/economia/2023/04/vai-um-cafezinho-ai-cafeicultura-capixaba-e-a-3a-maior-do-mundo/>>. Acesso em: 20 jul. 2025.



FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Coffee development report 2021: Growing for prosperity**. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <<https://www.fao.org>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

FERNÁNDEZ, Carolina et al. **Characterization of coffee processing wastewater: Physico-chemical variability and its implications for treatment design**. Journal of Environmental Management, v. 226, p. 147–156, 2018.

HENDGES, Antônio Sílvio. **Outorga de direito e cobrança do uso de recursos hídricos**. EcoDebate, 20 abr. 2015. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2015/04/20/saiba-mais-outorga-de-direito-e-cobranca-do-uso-de-recursos-hidricos-artigo-de-antonio-silvio-hendges/>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

HESPAÑHOL, Ivanildo; MIERZWA, José Carlos. **Água na agricultura: gestão, uso e reuso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente. **Instrução Normativa nº 013/2007. Orienta manejo da água residuária em propriedades rurais**. Disponível em: <<http://www.iema.es.gov.br>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

IMHOFF, K.; IMHOFF, R. K. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1986. Tradução da 26ª edição alemã. Por Max Lothar Hess.

ILSABRASIL. *Como a estiagem e as temperaturas altas podem comprometer a produção de café*. 2023. Disponível em: <<https://ilsabrasil.com.br/como-a-estiagem-e-as-temperaturas-altas-podem-comprometer-a-producao-de-cafe/>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3ª ed. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2001. 720 p.

KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. 4. ed. Piracicaba: E. J. Kiehl, 2012.

Kumar, V., Verma, P., de Freitas, FA et al. **Uma revisão crítica sobre a geração de biocombustíveis a partir de lodo de fábrica de celulose e papel, com ênfase em métodos de pré-tratamento: energia renovável para a sustentabilidade**

**ambiental. BMC Environ Sci** **2**, 2 (2025). Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s44329-024-00016-0>> Acesso em: 01 ago. 2025

LO MONACO, P. A. **Fertirrigação do cafeeiro com águas residuárias da lavagem e descascamento de seus frutos**. 2005. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MATOS, A. T, de. **Tratamento de resíduos na pós-colheita do café**. In: BOREM, F. M. (Ed.). Pós-colheita do café. Lavras: Ed. UFLA, Cap. 6, p.159-201. 2008.

MATOS, A. T. de.; EUSTÁQUIO JÚNIOR, V. MATOS, M. P. de. **Eficiência de aeração e consumo de oxigênio no tratamento de água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro em sistema de aeração em cascata**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 35, n. 5, p. 941-950, set-out, 2015.

MATOS, A. T.; CABANELLAS, C. F. G.; SILVA J. S. E; MACHADO, M. C. **Qualidade de bebida de grãos de café processados com água sob recirculação e tratamento físico-químico**. Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa-MG, v. 14, n. 3, p. 141-147, jul./set., 2006.

MATOS, J. **Gestão hídrica e reutilização da água no processamento de café**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 26, n. 4, p. 657–666, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbea>. Acesso em: 02 ago. 2025.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reuso**. São Paulo: Oficina de textos. 2008. 144 p.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Recursos Hídricos: balanço de implementação 2021**. Brasília: MMA, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MORELI, L. **Caracterização e reutilização da água residuária do processamento de café arábica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <<https://www.biblioteca.ufv.br>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MOURA, S. C. S. R. et al. **Influence of coffee fruit maturation stage on chemical composition and beverage quality**. *Journal of Food Quality*, [S. l.], v. 40, n. 4, p.

1–8, 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17454557>>. Acesso em: 19 jul. 2025.

**ONU - Organização das Nações Unidas.** Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro: ONU, 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>>. Acesso em: 19 jul. 2025.

ORR, C. **Particulate technology.** NewYork: **The Macmillan Co**, 966. Disponível em: <[https://primoa.library.unsw.edu.au/discovery/fulldisplay?docid=alma9942924560001731&context=L&vid=61UNSW\\_INST:UNSW&lang=en&search\\_scope=MyInst\\_and\\_CI&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=Everything&query=sub,exact,%20Particles%20,AND&mode=advanced&offset=0](https://primoa.library.unsw.edu.au/discovery/fulldisplay?docid=alma9942924560001731&context=L&vid=61UNSW_INST:UNSW&lang=en&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=Everything&query=sub,exact,%20Particles%20,AND&mode=advanced&offset=0)>. Acesso em: 20 de mai. de 2025.

PEREIRA, L. L.; BORÉM, F. M.; TAVEIRA, J. H. da S. **Post-harvest processing and quality of specialty coffees.** Coffee Science, Lavras, v. 15, e151675, 2020. Disponível em: <<https://www.coffeescience.ufla.br>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

Perfect Daily Grind. **O ponto perfeito da colheita**, 2022. Disponível em: <<https://perfectdailygrind.com/pt/2022/06/07/o-ponto-perfeito-da-colheita/>>. Acesso em: 21, Jan. 2025.

PIMENTA, C. J.; VILELA, D. M.; CARVALHO, V. D. **Processamento do café e qualidade da bebida.** Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, v. 43, n. 1, p. 25–34, 2018. Disponível em: <<https://www.revistas.ufv.br/index.php/rbarmazenamento>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PREZOTTI, L. C.; ROCHA, A. A.; SOARES, S. F.; GUARÇONI, A.; MORELLI, P. **Alterações das características químicas do solo submetido à aplicação de água residuária do processamento pós-colheita dos frutos de café e sua influência sobre o crescimento de plantas de milho.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 34, 2013, Caxambu. Trabalhos apresentados... Rio de Janeiro: MAPA: PROCAFÉ, 2008a. p. 83-85.

PREZOTTI, L. et al. **Caracterização da água residuária do processamento de café: nutrientes e potencial de fertirrigação.** Coffee Science, v. 7, n. 2, p. 45–57, 2012. Disponível em: <<https://www.coffeescience.org>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

REUTERS. **Brazil's coffee farmers turn to costly irrigation to quench global demand brew.** 31 mar. 2025. Disponível em:

<<https://www.reuters.com/markets/commodities/brazils-coffee-farmers-turn-costly-irrigation-quench-global-demand-brew-2025-03-31/>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

RIBEIRO, D. E.; CARVALHO, A. M.; PEREIRA, R. G. **Classificação e processamento de frutos de café: avanços tecnológicos e impactos na qualidade.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 41, n. 5, p. 513–523, 2021. Disponível em: <<https://www.revistas.unesp.br/index.php/EngAgric>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

RIQUEIRA, L. P.; LACERDA FILHO, J. V. DE; MATOS, A. T. DE. **Avaliação da eficiência de tanques sépticos e filtros anaeróbios no tratamento de efluente da despolpa do café.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 655-662, set./dez. 2005.

RODRIGUES, C. S. D., et al. (2017). **Tratamento da água residuária do café por eletrofloculação em reator contínuo.** *Anais do Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras*. Disponível em: <[sbicafe.ufv.br](http://sbicafe.ufv.br)>. Acesso em: 06 jul. 2025.

SCHULER, Andrew J. **O caso da densidade variável: uma nova perspectiva sobre a sedimentação de lodo ativado,** 2007. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/5878870\\_The\\_Case\\_for\\_Variable\\_Density\\_A\\_New\\_Perspective\\_on\\_Activated\\_Sludge\\_Setting](https://www.researchgate.net/publication/5878870_The_Case_for_Variable_Density_A_New_Perspective_on_Activated_Sludge_Setting)>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Café com Sustentabilidade: guia para a produção responsável.** Brasília: SEBRAE, 2022. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SILVA, J. P.; ANDRADE, V. T.; FERREIRA, C. F. Colheita e pós-colheita do café: desafios e perspectivas. Enciclopédia Biosfera, Goiânia, v. 16, n. 30, p. 1455–1470, 2019. Disponível em: <<https://www.biosfera.org.br>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SILVA, M. A. et al. **Características da água residuária do café e alternativas de tratamento.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 10, p. 1096–1103, 2013.

SILVA, T. R. S., et al. (2019). **Aplicação de coagulantes naturais no tratamento da água residuária do café.** *Anais do Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras*. Disponível em: <sbicafe.ufv.br>. Acesso em: 09 jul. 2025.

THE WASHINGTON POST. **Brazil drought squeezes coffee farmers, driving up global prices.** 14 mar. 2025. Disponível em: <<https://www.washingtonpost.com/world/2025/03/14/brazil-coffee-prices-arabica-starbucks-drought/>>. Acesso em: 17 jul. 2025.

USP - Universidade de São Paulo; NATURE COMMUNICATIONS. **Mais da metade dos rios brasileiros está secando; problema é maior onde há atividade agrícola intensiva.** Brasil de Fato, São Paulo, 17 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.brasildefato.com.br/2025/02/17/mais-da-metade-dos-rios-brasileiros-esta-secando-problema-e-maior-onde-ha-atividade-agricola-intensiva/>>. Acesso em: 19 jul. 2025.

WINTGENS, J. N. (2004). **Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. A Guidebook for Growers, Processors, Traders and Researchers.** Tokyo: UN Food and Agriculture Organization (FAO) & Deutscher Kaffeverband e.V.

Zawadzińska, A.; Salachna, P.; Nowak, JS; Kowalczyk, W.; Piechocki, R.; Łopusiewicz, Ł.; Pietrak, A. **Composto à base de lodo de fábrica de celulose e papel, resíduos de frutas e vegetais, substrato de cogumelos e palha de centeio melhora a produtividade e o valor nutricional do tomate.** *Agronomy* 2022, 12, 13. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy12010013>>. Acesso em: 17 jul. 2025.