

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**VANESSA TRES**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA, SOCIAL E AMBIENTAL  
PARA SELEÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO EM ÁREAS  
RURAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2021**

VANESSA TRES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA, SOCIAL E AMBIENTAL  
PARA SELEÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO EM ÁREAS  
RURAIS**

**Technical-Economic, Social and Environmental Feasibility Study for Selection of  
Domestic Sewage Treatment in Rural Areas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência em Tecnologia Ambiental.

Área de Concentração: Tecnologias e Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Monitoramento e Gestão Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Júlio César Rodrigues de Azevedo  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Heloise Garcia Knapik

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, **desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.**



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



VANESSA TRES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA, SOCIAL E AMBIENTAL PARA SELEÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO EM ÁREAS RURAIS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Ciência E Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologias E Processos Ambientais.

Data de aprovação: 10 de Setembro de 2021

Prof Julio Cesar Rodrigues De Azevedo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Heloise Garcia Knapic, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Marcelo Real Prado, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Maurici Luzia Charnevski Del Monego, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/09/2021.

*À todas as famílias moradoras de áreas rurais,  
comunidades ribeirinhas, quilombolas e terras indígenas:  
saneamento é direito de todos!*

*À todas as gestões municipais brasileiras, que este estudo  
contribua para a avaliação estratégica do saneamento.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me manter de pé em todos os meus momentos de dúvida e aflição. Agradeço por estar sempre presente na minha vida e me proporcionar tantas graças alcançadas.

À minha família, Joacir (meu pai), Solange (minha mãe), e Andressa e Gabriele (minhas irmãs). Obrigada por estarem do meu lado desde o início desta e de todas as jornadas da minha vida, me cuidando e me ajudando a manter o foco e ver o lado bom das coisas. Sem o apoio de vocês, nada disso seria possível, obrigada!

Ao Daniel e família. Obrigada pelo carinho e apoio! Daniel, obrigada por acreditar e confiar em mim, e obrigada por ser tão companheiro, superando as derrotas e comemorando as vitórias junto comigo.

Ao Prof. Júlio César, meu orientador. Obrigada por aceitar tantas alterações de tema, até que eu encontrasse algo que meu coração batesse mais forte. Obrigada por me permitir trabalhar com algo que amo.

À Prof.<sup>a</sup> Heloise, minha coorientadora. Obrigada por tantas conversas e conselhos, desde a minha graduação. Obrigada por ser referência para mim e tantos(as) outros(as) alunos(as), por ser tão carinhosa e inovadora, e por sempre se preocupar com seus alunos(as).

Ao Professor Marcelo e Professora Maurici, meus professores de banca. Obrigada por aceitarem entrar nessa jornada, e pelas contribuições com o projeto!

A todos os amigos e colegas. Obrigada por entenderem minha ausência em certos momentos de dedicação de trabalho e mestrado, obrigada pela preocupação e pela ajuda.

*Viva uma vida que mude vidas.*

*Instituto Incanto*

## RESUMO

TRES, Vanessa. **Estudo de Viabilidade Técnica-Econômica, Social e Ambiental para Seleção de Tratamento de Esgoto Doméstico em Áreas Rurais**. 2021. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

Escolher qual é a melhor forma de tratamento de esgoto doméstico requer diversas análises e dados envolvidos. Em relação às áreas rurais e isoladas, esta tarefa se torna mais difícil pela falta de dados e direcionamento de análises que permitem a tomada de decisão sobre os sistemas mais viáveis para utilização nas áreas que englobam o saneamento rural. Diversos estudos de planejamento apresentam matrizes tecnológicas com os possíveis sistemas de tratamento de esgoto doméstico, mas qual é a melhor opção dentre as existentes? Assim, por meio deste estudo foi realizado um levantamento de dados e informações ambientais, sociais, técnicas e econômicas, de estudos de caso e projetos piloto com tecnologias aplicáveis de forma descentralizada em clima subtropical úmido no Brasil. A partir deste levantamento de dados, o método de análise hierárquica – *Analytic Hierarchy Process* (AHP) – foi aplicado em diferentes cenários utilizando indicadores divididos em critérios ambiental, social e técnico-econômico, de forma a ser avaliada os principais sistemas (os prioritários) em cada critério e de forma geral. Para os critérios e indicadores selecionados foram definidos pesos (grau de importância) que permitiram a avaliação dos sistemas e tomadas de decisão dos mais prioritários com base nas tecnologias mais sustentáveis. Foram 11 configurações de sistemas de tratamento de esgoto avaliadas que continham em uma única ou mais de uma etapa tratamentos por digestão anaeróbia, alagados construídos e filtros (anaeróbio e de areia). De forma geral, dentre todos os cenários realizados (avaliando a sensibilidade do método com base nos dados e graus de importância dos critérios utilizados), o sistema composto por Reator Aerado de Fluxo Ascendente compacto (RAF), Tanque Séptico e Filtro Anaeróbio (TSE + FAN) e Tanque Séptico e Sistema Alagado Construído de fluxo subsuperficial vertical (TSE + SACv) foram os que demonstraram ser os mais indicados, em comparação com os demais, para a área de estudo definida. Ainda, a realização de diversos cenários fez com que as prioridades em cada critério e de forma geral alterassem, conforme os dados dos indicadores utilizados para cada alternativa (cada sistema) e conforme os pesos de cada critério (grau de importância entre eles). Esta variação ocorrida demonstra que apesar do método AHP ser válido para utilização da escolha de tratamento de esgoto em áreas rurais e isoladas (comparação de diferentes tipos de sistemas), o método é sensível aos dados utilizados e graus de importância julgados para critérios e indicadores. O que não impede a sua utilização para o objetivo citado, sendo que quanto maior o número de dados utilizados nos indicadores, melhor e mais preciso a aplicação do método é, e que opiniões públicas e de especialistas podem contribuir para a definição do grau de importância dos critérios e indicadores utilizados.

**Palavras-chave:** Esgoto doméstico, Área rural, Tratamento, Método de Análise Hierárquica.

## ABSTRACT

TRES, Vanessa. **Technical-Economic, Social and Environmental Feasibility Study for Selection of Domestic Sewage Treatment in Rural Areas**. 2021. 146 f. Dissertation (Master's in Environmental Science and Technology) – Federal Technology University – Paraná, Curitiba, 2021.

Choosing the best structure of domestic sewage treatment requires a variety of analyses and data involved. In relation to rural and isolated areas, this task is more difficult due to the lack of data and driving analysis that allows decision-making process on the most viable systems for use in areas that embrace rural sanitation. Several planning studies present technological matrices with possible domestic sewage treatment systems, but which system is the best option among the existing ones? Thus, through this study, a survey of environmental, social, technical and economic data and information was carried out, of case studies and pilot projects with technologies applicable in a decentralized way in humid subtropical climate in Brazil. From this data collection, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied in different scenarios using indicators divided into environmental, social and technical-economic criteria, in order to evaluate the main systems (the priority ones) in each criterion and in general. For the selected criteria and indicators, weights (degree of importance) were defined in order to allow the evaluation of the systems and decision-making of the most priority based on the most sustainable technologies. There were 11 configurations of domestic sewage treatment systems evaluated that contained in a single or more than one stage treatments by anaerobic digestion, wetlands and filters (anaerobic filter and sand filter). In general, among all the scenarios performed (evaluating the sensitivity of the method based on the data and degrees of importance of the criteria used), the system composed by compact Upflow Anaerobic Sludge Blanket, Septic Tank and Anaerobic Filter and Septic Tank and Wetland with vertical subsurface flow were the ones that proved to be the most indicated, compared to the other ones, for the defined study area. Furthermore, the realization of several scenarios caused the priorities in each criterion and in general to change, according to the data of the indicators used for each alternative (each system) and according to the weights of each criterion (degree of importance between them). This variation demonstrates that although the AHP method is valid for the use of the choice of sewage treatment in rural and isolated areas (comparison of different types of systems), the method is sensitive to the data used and degrees of importance judged for criteria and indicators. This does not prevent its use for the objective mentioned, since the greater the number of data used in the indicators, the better and more accurate the application of the method is, and that public and expert opinions can contribute to the definition of the degree of importance of the criteria and indicators used.

**Keywords:** Wastewater, Rural areas, Treatment, Analytic Hierarchy Process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esgotamento doméstico convencional e suas divisões. ....	19
Figura 2 – Agrupamento dos domicílios, conforme setores censitários do IBGE e metodologia da FUNASA. ....	20
Figura 3 – Atendimento à coleta e tratamento de esgoto em áreas rurais. ....	21
Figura 4 – Relação entre coleta e tratamento de esgoto e a renda domiciliar mensal, a nível nacional. ....	26
Figura 5 – Matriz tecnológica de soluções individuais de coleta e tratamento de esgoto, conforme PNSR. ....	31
Figura 6 – Matriz tecnológica de soluções coletivas de coleta e tratamento de esgoto, conforme PNSR. ....	31
Figura 7 – Fluxograma para a escolha da alternativa para tratamento de esgoto em comunidades isoladas. ....	32
Figura 8 – Estrutura básica de implementação de métodos de decisão multicritério para tomada de decisão. ....	33
Figura 9 – Esquema representativo do método de análise hierárquica. ....	35
Figura 10 – Estrutura básica de implementação de métodos de decisão multicritério para tomada de decisão. ....	36
Figura 11 – Processo metodológico utilizado na elaboração deste estudo. ....	43
Figura 12 – Regiões de clima Cfa e Cfb em território brasileiro. ....	45
Figura 13 – Detalhamento da metodologia na Etapa 1 do Método AHP. ....	54
Figura 14 – Detalhamento da metodologia na Etapa 2 do Método AHP. ....	54
Figura 15 – Detalhamento da metodologia na Etapa 3 do Método AHP. ....	57
Figura 16 – Detalhamento da metodologia na Etapa 4 do Método AHP. ....	60
Figura 17 – Municípios com arranjos de coletas e tratamento de esgoto doméstico de uso descentralizado em estudos publicados para a região delimitada. ....	63
Figura 18 – Sistemas de tratamento de esgoto doméstico avaliados pelo método AHP. ....	65
Figura 19 – Esquema representativo de um TSE. ....	70
Figura 20 – Esquema representativo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente. ....	72
Figura 21 – Esquema representativo de um SACH. ....	75
Figura 22 – Esquema representativo de um SACv. ....	76
Figura 23 – Esquema representativo de um filtro anaeróbio. ....	80
Figura 24 – Esquema representativo de um filtro de areia. ....	81
Figura 25 – Esquema representativo da relação entre os pesos dos critérios e indicadores. ....	87
Figura 26 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário base. ....	95
Figura 27 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade dos dados – valores médios. ....	100
Figura 28 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade dos dados – valores máximos. ....	102
Figura 29 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade dos dados – valores mínimos. ....	104
Figura 30 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb). ....	108
Figura 31 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa). ....	110
Figura 32 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb). ....	114

Figura 33 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfb).....	116
Figura 34 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade de julgamentos e pesos – critério social como prioridade. ....	120
Figura 35 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade de julgamentos e pesos – critério ambiental como prioridade.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros físicos, químicos e biológicos do esgoto doméstico.....	18
Tabela 2 – Organismos patogênicos e principais doenças de transmissão feco-oral associadas à água. ....	25
Tabela 3 – Métodos comumente usados em análises de diversos critérios qualitativos e quantitativos. ....	34
Tabela 4 – Principais indicadores utilizados em métodos de análise hierárquica de sistemas de tratamento de esgoto doméstico. ....	39
Tabela 5 – Relação de critérios e indicadores utilizados na avaliação da viabilidade. ....	46
Tabela 6 – Referencial utilizado para os indicadores técnico-econômicos da avaliação hierárquica. ....	47
Tabela 7 – Referencial utilizado para os indicadores ambientais da avaliação hierárquica. ....	49
Tabela 8 – Referencial utilizado para os indicadores sociais da avaliação hierárquica. ....	50
Tabela 9 – Escala linear de comparações do método AHP. ....	51
Tabela 10 – Escalas de normalização dos pesos atribuídos às alternativas, em relação à cada indicador. ....	58
Tabela 11 – Índice Randômico, de acordo com a ordem da matriz de comparações em pares. ....	59
Tabela 12 – Sistemas de tratamento de esgoto doméstico encontrados no levantamento de dados. ....	64
Tabela 13 – Indicadores técnico-econômicos dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico. ....	66
Tabela 14 – Indicadores ambientais dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico. ....	67
Tabela 15 – Indicadores sociais dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico. ....	68
Tabela 16 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por TSE. ....	71
Tabela 17 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por RAF. ....	73
Tabela 18 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por SACH. ....	78
Tabela 19 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por SACv. ....	78
Tabela 20 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por FAN. ....	83
Tabela 21 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por FAR. ....	83
Tabela 22 – Matriz de comparação em pares dos critérios e seus respectivos pesos calculados. ....	84
Tabela 23 – Matriz de comparação em pares dos indicadores técnico-econômicos e seus pesos calculados. ....	85
Tabela 24 – Matriz de comparação em pares dos indicadores sociais e seus pesos calculados. ....	85
Tabela 25 – Matriz de comparação em pares dos indicadores ambientais e seus pesos calculados. ....	86
Tabela 26 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador ITE01. ....	88
Tabela 27 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador ITE02. ....	89
Tabela 28 – Matriz de comparação em pares da escala dos indicadores ITE03, ISO02 e ISO03. ....	89
Tabela 29 – Matriz de comparação em pares da escala dos indicadores IAM01, IAM02, IAM04, IAM05, IAM06 e IAM07. ....	90
Tabela 30 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador IAM03. ....	91
Tabela 31 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador ISO01. ....	91
Tabela 32 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário base. ....	94

Tabela 33 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos dados 01 – valores médios. ....	99
Tabela 34 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos dados – valores máximos. ....	101
Tabela 35 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos dados – valores mínimos.....	103
Tabela 36 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb). ....	107
Tabela 37 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa)..	109
Tabela 38 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb). ....	113
Tabela 39 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfb)..	115
Tabela 40 – Matriz de comparação em pares dos critérios e seus respectivos pesos – com prioridade social. ....	117
Tabela 41 – Matriz de comparação em pares dos critérios e seus respectivos pesos – com prioridade ambiental. ....	117
Tabela 42 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos julgamentos e pesos – critério social como prioridade. ....	119
Tabela 43 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade de julgamentos e pesos – critério ambiental como prioridade. ....	121
Tabela 44 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente ao critério técnico-econômico. ....	124
Tabela 45 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente ao critério ambiental. ....	125
Tabela 46 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente ao critério social. ...	126
Tabela 47 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente a prioridade geral...	127
Tabela 48 – Dados desmembrados de cada referência utilizada no estudo. ....	141

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	16
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>17</b>
3.1.	AS CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DO ESGOTO DOMÉSTICO .....	17
3.2.	O PANORAMA DOS SERVIÇOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL E OS DESAFIOS DA UNIVERSALIZAÇÃO DO ACESSO .....	19
3.3.	OS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS CAUSADOS PELA FALTA DE COLETA E TRATAMENTO DO ESGOTO DOMÉSTICO .....	23
3.4.	A GESTÃO DOS SERVIÇOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO RURAL .....	28
3.5.	A ANÁLISE DE INDICADORES SOCIAIS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS E SEU AUXÍLIO NA TOMADA À DECISÃO .....	33
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>42</b>
4.1.	LEVANTAMENTO DE DADOS E INFORMAÇÕES.....	44
4.1.1.	Área de Estudo .....	44
4.1.2.	Definição dos Sistemas de Tratamento de Esgoto Doméstico em Áreas Rurais.....	45
4.1.3.	Definição dos Critérios, Indicadores e Dados para a Avaliação Hierárquica dos Sistemas ..	46
4.2.	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA.....	50
4.2.1.	Elaboração das Matrizes de Comparação em Pares e Cálculo dos Pesos.....	50
4.2.2.	Análise da Consistência dos Pesos Obtidos nas Matrizes de Comparação em Pares .....	58
4.2.3.	Cálculo das Prioridades Parciais e Globais.....	59
4.2.4.	Análise de Sensibilidade do Método ao Objetivo Estabelecido por Elaboração de Diferentes Cenários .....	61
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
5.1.	OS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO APLICÁVEIS EM ÁREAS RURAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	63
5.1.1.	Sistemas de Tratamento de Digestão Anaeróbia (Tanque Séptico e Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente) .....	69
5.1.2.	Sistemas de Tratamento de Alagados Construídos .....	74
5.1.3.	Sistemas de Tratamento por Filtros Anaeróbios e Filtros de Areia .....	79
5.2.	A ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS MULTICRITÉRIOS DAS SOLUÇÕES APLICÁVEIS .....	84
5.2.1.	Resultados da Análise Hierárquica: Cenário Base.....	92
5.2.2.	Resultados da Análise Hierárquica: Cenário de Sensibilidade dos Dados .....	96

5.2.3.	Resultados da Análise Hierárquica: Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo (Aspectos Climáticos).....	105
5.2.4.	Resultados da Análise Hierárquica: Cenário de Sensibilidade dos Julgamentos e Pesos ...	117
5.3.	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE HIERÁRQUICA.....	123
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>128</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>130</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS DESMEMBRADOS DE CADA REFERÊNCIA UTILIZADA NO ESTUDO.....</b>	<b>140</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O acesso às infraestruturas de saneamento básico é garantido pela Constituição Federal do Brasil, sendo competência da União, Estados, Distrito Federal e Municípios a promoção de programas de melhorias em saneamento (BRASIL, 1988) – constituído pelo conjunto dos serviços de: água potável; esgotamento sanitário; resíduos sólidos; e drenagem urbana (BRASIL, 2007). Os serviços de saneamento, principalmente esgotamento sanitário, são um importante aspecto no que se refere a saúde pública (BARROSO, 2002) pela sua relação com a presença e/ou ausência de doenças de veiculação hídrica (ROSEN, 1994). Ainda, a prestação de tais serviços tem fundamento a universalização do acesso, ou seja, a ampliação do acesso ao saneamento básico a todos os domicílios ocupados (BRASIL, 2007) com, principalmente, igualdade (todos tem direito de acesso aos serviços) e equidade (tais serviços devem ser prestados superando as diferenças evitáveis, desnecessárias e injustas) (MCIDADES, 2013).

Contudo, a busca pela universalização do acesso é um dos grandes desafios da administração pública municipal (titulares dos serviços), principalmente quando se trata de saneamento rural – conceito que contempla o acesso ao saneamento por diferentes formas de organização social em terras rurais, sendo os proprietários ou não de terra, populações tradicionais (quilombolas, extrativistas e pescadores) e povos originários (indígenas) (FUNASA, 2019b). Quando se trata dos serviços de coleta e tratamento de esgoto doméstico, o cenário atual não é dos melhores – apresentando um *déficit* de 79,4% para a população residente em áreas rurais, isoladas e aglomerados próximas do urbano (FUNASA, 2019b). Dentre as formas de escoamento de esgoto doméstico, há grande persistência do uso de fossas rudimentares (buraco no solo para despejo de dejetos humanos) além do afastamento do esgoto de cozinhas, lavanderias, entre outros (ambas as formas inadequadas para o tratamento de esgoto doméstico). Em 2010, 20,6% da população rural possuía atendimento adequado, 54,1% possuía atendimento precário e 25,3% não possuem nenhum tipo de atendimento em relação aos serviços de esgotamento sanitário (FUNASA, 2019b).

Na busca pela universalização dos serviços, os investimentos são altos. Em 2013, o PLANSAB estimou que cerca de R\$ 32,15 bilhões seriam necessários para investimentos na expansão e melhorias dos serviços de esgotamento sanitário nas áreas rurais até 2038, incluindo as instalações hidrossanitárias (MCIDADES, 2013). Ainda, o recém-lançado Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) estimou que R\$ 141,6 bilhões de investimentos são necessários para a expansão e reposição de infraestruturas de sistemas coletivos e individuais

de coleta e tratamento de esgoto doméstico, até 2038 (FUNASA, 2019b). Tal expansão e reposição de infraestruturas correspondem ao investimento de R\$ 65,33 bilhões em coleta e R\$ 24,42 bilhões em tratamento de soluções coletivas, e ao investimento de R\$ 51,83 bilhões em soluções individuais de esgotamento sanitário (FUNASA, 2019b). Não foram identificados, até então, andamentos na efetivação dos investimentos previstos.

Neste cenário de investimentos, destacando os serviços de esgotamento sanitário, o PNSR propõe diversas tecnologias (configurações de sistemas) de coleta e tratamento de esgoto doméstico (tanto coletivas quanto individuais) possíveis de serem implantadas conforme as formas de organização social.

Dentre várias configurações de sistemas, qual seria o mais indicado? Cada sistema de tratamento de esgoto doméstico possui suas características qualitativas e quantitativas e, desta forma, é possível associar o planejamento (neste caso, escolha do sistema em determinada região) à estudos que auxiliem na fundamentação da escolha e aplicação da solução mais viável dentre as disponíveis.

Assim, as análises de multicritérios apresentam-se como ferramentas capazes de alinhar indicadores quantitativos e qualitativos, de acordo com critérios pré-estabelecidos, para a integração de fatores relevantes no processo de avaliação dos sistemas e na tomada de decisão (FRANCISCO *et al*, 2007; BORZA & PRETESCU, 2016; CAMPOLINA *et al*, 2017). Relevante, também, é a utilização desta metodologia para o julgamento da sustentabilidade na tomada de decisão (SANTOS *et al*, 2019), partindo de critérios ambientais, sociais e econômicos dos sistemas avaliados e comparando-os com julgamentos que auxiliem na escolha do sistema mais sustentável. Dentre os diferentes métodos de análise de multicritérios, o método de análise hierárquica – *Analytic Hierarchy Process* (AHP) – é um dos possíveis métodos que permitem a avaliação de critérios e indicadores qualitativos e quantitativos capazes de atribuir em dados o grau de sustentabilidade de cada sistema, em forma de hierarquia (SANTOS *et al.*, 2019) – permitindo a escolha da implementação do sistema mais sustentável.

Assim, por meio da elaboração deste estudo, a hierarquização de diversos sistemas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais foi elaborada utilizando a metodologia AHP, com indicadores técnico-econômicos, sociais e ambientais, oportunizando a definição dos principais sistemas (melhores escolhas) para implementação (soluções econômicas, que garantem o atendimento aos parâmetros sociais e ambientais). Com base nos resultados obtidos, as informações aqui levantadas poderão contribuir às estratégias de universalização do saneamento rural, auxiliando tomadores de decisão (titulares e prestadores dos serviços) na escolha de sistemas alternativos de tratamento de esgoto doméstico.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Classificar sistemas de tratamento de esgoto doméstico para domicílios rurais brasileiros, com base na metodologia de tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP), para julgar de forma hierárquica a viabilidade técnica-econômica, social e ambiental dos sistemas avaliados.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar as soluções de tratamento de esgoto doméstico aplicáveis em municípios de áreas rurais brasileiras, pertencentes da zona de clima subtropical úmido onde não há estação de seca (área de estudo);
- Realizar o levantamento de dados e informações para indicadores técnico-econômicos, sociais e ambientais dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico utilizados na área de estudo;
- Analisar, com base no método AHP, os sistemas de tratamento de esgoto, para a otimização de escolhas na implementação da solução;
- Realizar a análise de sensibilidade do método AHP para os julgamentos realizados;
- Elaborar diferentes cenários, com base em alterações de dados e julgamentos utilizados no método AHP, para avaliar as alterações decorrentes das informações adotadas.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Sendo comum o cenário onde há o passivo socioambiental causado pela falta de tratamento de esgotos domésticos em áreas rurais, é fundamental a avaliação de soluções que permitam maior qualidade de vida e menor impacto ambiental negativo. As características do esgoto doméstico e seus impactos fundamentam esta avaliação, assim como o panorama das infraestruturas de tratamento de esgoto em áreas rurais.

Como forma de solução, a gestão dos serviços (de coleta e tratamento de esgotos domésticos) em áreas rurais parte do pressuposto de que as técnicas frequentemente utilizadas em áreas urbanas não são eficientes em áreas rurais, pela ampliação da escala e redução da demanda (baixa densidade demográfica). Além disso, a utilização de tais técnicas está condicionada ao planejamento dos serviços, a fim de buscar a sua universalização (garantia de acesso a todos os domicílios). Assim, metodologias para a análise das técnicas de tratamento de esgoto doméstico fundamentam a escolha utilizada.

Neste contexto, apresentam-se, a seguir, a fundamentação da problemática desta dissertação. Tal conteúdo foi base para a metodologia desta dissertação: (i) levantamento de sistemas de tratamento de esgoto utilizados na área de estudo; (ii) conhecimento das características qualitativas e quantitativas de cada sistema; e (iii) aplicação do método de análise hierárquica para a avaliação das prioridades (melhores soluções).

#### 3.1. AS CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DO ESGOTO DOMÉSTICO

Aos resíduos de atividades humanas incorporados à água dá-se o nome de esgoto, efluente ou águas residuárias. Quando o esgoto é originário de atividades de higiene e limpeza (tomar banho, lavar a roupa, lavar a louça, entre outras), em domicílios, é classificado como esgoto doméstico (FUNASA, 2019a).

Suas características derivam de parâmetros químicos, físicos e biológicos (METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING, 2014) que categorizam o esgoto doméstico como água modificada de suas características naturais. Tais alterações existentes são provenientes de sólidos presentes no esgoto – os quais correspondem a 0,1% do esgoto doméstico, enquanto 99,9% do esgoto doméstico é água (VESILIND; MORGAN, 2011; VON SPERLING, 2014).

Neste contexto, a Tabela 1 apresenta os parâmetros físicos, químicos e biológicos de maior interesse em análises qualitativas de esgoto doméstico.

Tabela 1 – Parâmetros físicos, químicos e biológicos do esgoto doméstico.

Componente		Descrição
Parâmetros físicos	Temperatura	Intensidade de calor, ligeiramente elevada em esgoto doméstico, permitindo a intensificação da atividade microbiana, demais reações físicas e química, e redução da solubilidade de gases.
	Cor	Ligeiramente cinza para esgoto fresco e cinza escuro para esgoto séptico.
	Odor	Relativamente desagradável.
	Turbidez	Intervêm na passagem de luz pela água, interferindo na fotossíntese e atribuindo à água uma aparência turva.
Parâmetros químicos	Sólidos totais	Substâncias orgânicas e inorgânicas, suspensas (fixas ou voláteis), dissolvidas (fixas ou voláteis) ou sedimentáveis presentes no esgoto doméstico.
	Matéria orgânica	Dividida entre matéria carbonácea biodegradável (proteínas, gorduras, carboidratos, entre outras substâncias utilizadas no processo metabólico de microrganismos) e não biodegradável (detergentes, sabões, entre outros produtos químicos não passíveis de decomposição biológica).
	Nitrogênio	Substância presente na água como nitrogênio molecular ( $N_2$ ), nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão), nitrogênio amoniacal ( $N-NH_3$ ), nitrito ( $NO_2^-$ ) e nitrato ( $NO_3^-$ ). A presença de $N-NH_3$ indica contaminação recente em corpos hídricos.
	Fósforo	Pode estar presente na água como ortofostatos ( $PO_4^{3-}$ , $HPO_4^{2-}$ , $H_2PO_4^-$ , $H_3PO_4$ ), polifostato (moléculas com dois ou mais átomos de fósforo) e fósforo orgânico. Os ortofostatos são substâncias que são diretamente utilizadas no metabolismo biológico – enquanto os polifostatos são substâncias mais complexas de degradação.
	pH	Presença de íons hidrogênio ( $H^+$ ), que caracterizam a acidez. Valores de pH que não condizem com um meio neutro (afastados de 7, em uma escala de 0 a 14), podem afetar a atividade microbiana de tratamento biológico de esgotos e afetar a vida aquática.
	Alcalinidade	Presença de bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e íon hidroxila ( $OH^-$ ) que possuem a capacidade de resistir às variações do pH (capacidade de neutralizar o meio ácido).
Parâmetros biológicos	Bactérias	Organismos monera unicelulares de várias formas e tamanhos, principal grupo responsável pela estabilização da matéria orgânica.
	Algas	Organismos autotróficos e fotossintetizantes, importantes para a produção de Oxigênio ( $O_2$ ) em água e processos de tratamento de esgoto.
	Fungos	Organismos aeróbios, multicelulares, não fotossintéticos e heterotróficos, importantes no processo de estabilização da matéria orgânica.
	Protozoários	Organismos unicelulares que se alimentam de bactérias, algas e fungos, essenciais para a manutenção de um equilíbrio entre os grupos de microrganismos no tratamento biológico – alguns tipos de protozoários podem ser patogênicos
	Vírus	Organismos parasitas, capazes de causar doenças e são de difícil remoção no tratamento de esgoto doméstico.
	Helmintos	Presença de animais superiores no esgoto doméstico. Ovos de helmintos podem causar doenças.

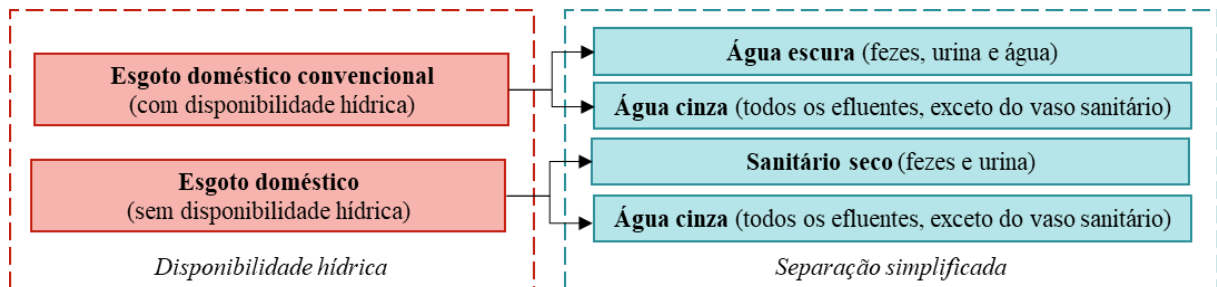
FONTE: Metcalf & Eddy (2003); Vesiling; Morgan (2011); Von Sperling (2014).

Destaca-se que, em relação à Matéria Orgânica (MO), sua degradação e estabilização é realizada por atividade microbiana que consome o Oxigênio Dissolvido (OD) durante seu processo metabólico (METCALF & EDDY, 2003). Sendo assim, sua quantificação pode ser calculada, de forma indireta, pelo consumo de OD por meio dos indicadores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) – indicadores tradicionalmente utilizados na análise qualitativa e quantitativa de MO em esgotos domésticos. A DBO quantifica (por convenção, no quinto dia de metabolismo bacteriano) a quantidade de

OD consumido para estabilizar a fração biodegradável da MO (VESILING; MORGAN, 2011; VON SPERLING, 2014), enquanto a DQO quantifica o consumo de OD durante a oxidação química da MO (VON SPERLING, 2014).

A composição do esgoto doméstico (suas características conforme Tabela 1) varia conforme a sua origem (vasos sanitários, pias de cozinha, chuveiros, máquina de lavar roupas, entre outros equipamentos). A FUNASA, em seu Catálogo de Soluções Sustentáveis de Saneamento (FUNASA, 2018), apresenta as “águas” a serem tratadas (Figura 1), conforme a disponibilidade hidrossanitária, sua configuração (se há a separação de esgotos), e sua origem.

Figura 1 – Esgotamento doméstico convencional e suas divisões.



FONTE: Adaptado de Funasa (2018).

Assim, conforme a quantidade e qualidade dos esgotos domésticos, a forma de tratamento adotada implica na necessidade de analisar diversas variáveis e parâmetros, a fim de definir a melhor forma de se atingir o objetivo (tratamento do esgoto doméstico em áreas rurais).

### 3.2. O PANORAMA DOS SERVIÇOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL E OS DESAFIOS DA UNIVERSALIZAÇÃO DO ACESSO

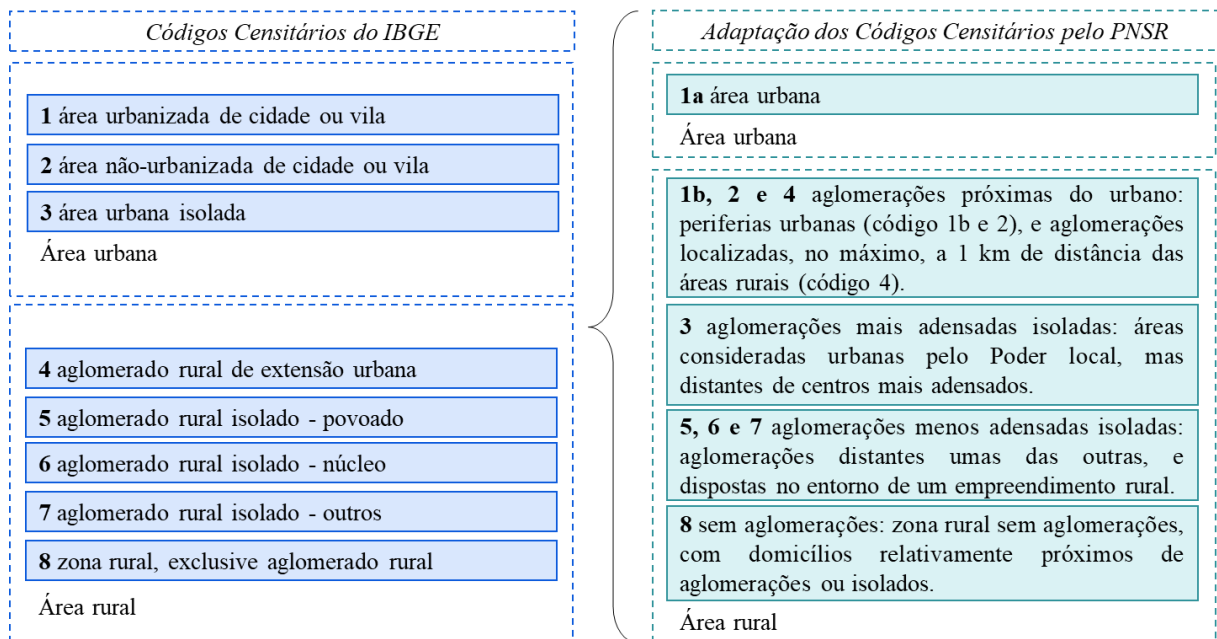
O panorama dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil apresenta desigualdades tanto na qualidade dos serviços quanto no seu acesso (IBGE, 2011a). A insuficiência dos serviços é uma realidade comum, tanto em áreas urbanas quando em áreas rurais – e se já ocorre na área urbana, na área rural a insuficiência é ainda maior (MELO, 2019).

Para entendimento da situação da coleta e tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais, é necessário compreender, também, o que é o rural para o saneamento. Muito além da definição do rural na sua forma territorial (espaço físico delimitado, pelo uso e ocupação do solo), o conceito de ruralidade (a identidade do meio rural) diz respeito às características e

culturas de vivência das pessoas que condicionam o seu modo de vida como de forma rural (ROLAND *et al.*, 2019). Adotando a hipótese de que o ambiente rural possui diferentes formas de ocupação e organização territorial, diferentes formas de ruralidade são encontradas: cada qual com seus costumes e sua realidade, que condicionam a diferentes formas de coleta e tratamento de esgoto doméstico (ROLAND *et al.*, 2019).

Nestas condições, o PNSR propôs uma metodologia para conhecimento da população em condições rurais de moradia e modo de vida, por meio dos setores censitários definidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2010). O agrupamento e enquadramento dos setores censitários foram redefinidos, durante a elaboração do PNSR, com base na densidade demográfica e a configuração espacial (pelo menos um setor censitário vizinho deve ser rural, para o setor censitário em análise ser considerado rural) (FUNASA, 2019b). Desta forma, a Figura 2 apresenta a configuração sugerida para a definição do rural para o saneamento.

Figura 2 – Agrupamento dos domicílios, conforme setores censitários do IBGE e metodologia da FUNASA.



FONTE: Funasa (2019b).

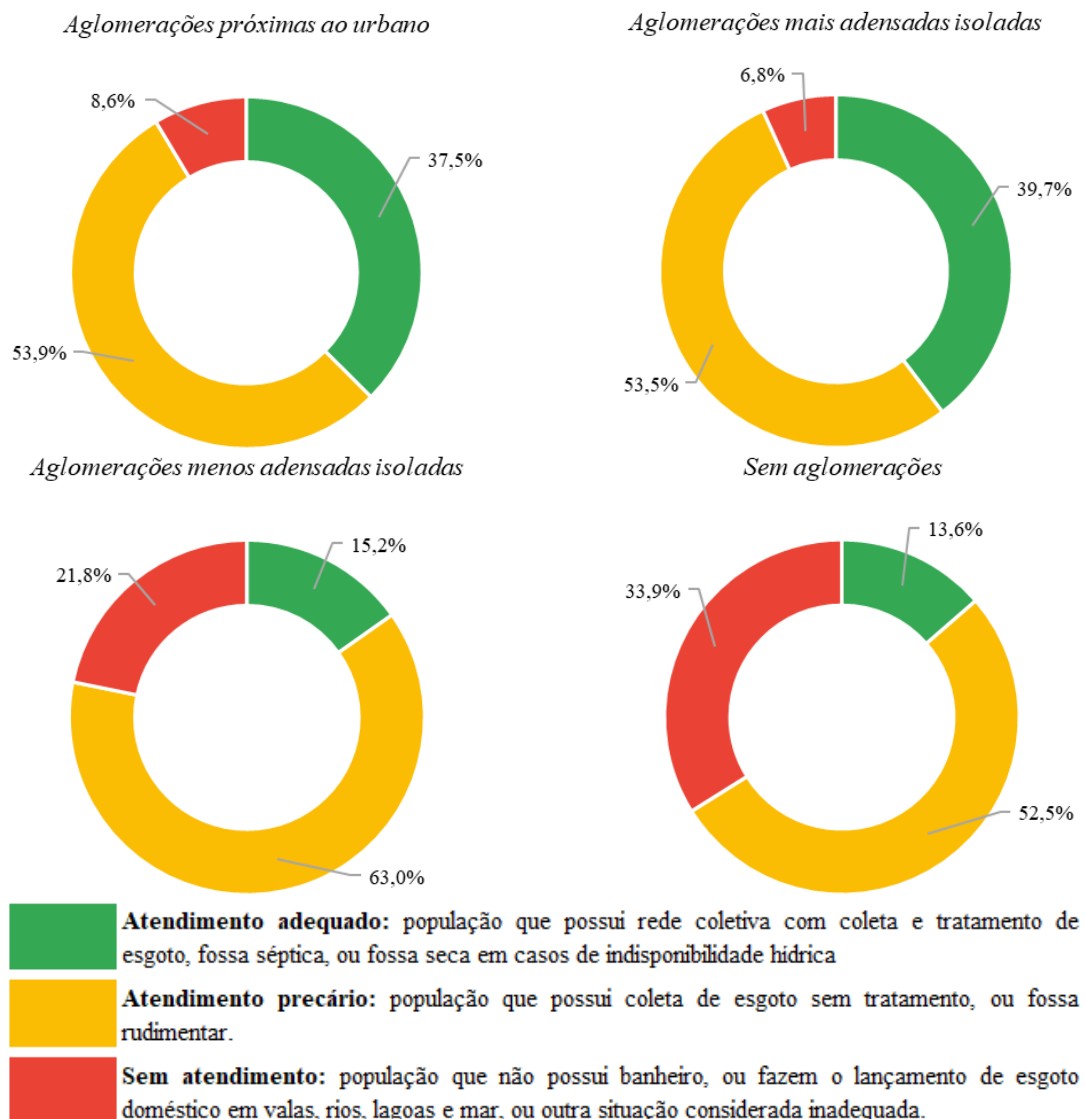
Assim, com base na população presente na redefinição sugerida, a análise situacional foi projetada no PNSR para a população brasileira residente em áreas rurais. Para os serviços de esgotamento sanitário, o atendimento foi considerado como (FUNASA, 2019b):

- a) **Adequado:** quando utilizado rede coletiva e tratamento de esgoto, fossa séptica, ou fossa seca (em casos de indisponibilidade hídrica);

- b) **Precário:** quando o esgoto é coletado por rede, mas não tem tratamento, e quando se faz o uso de fossa rudimentar; e
- c) **Sem atendimento:** quando os domicílios não possuem banheiro e/ou o lançamento de esgoto é em vala, rios, lagos, mar ou outras condições inadequadas.

Tendo isto em mente, a Figura 3 representa as informações estimadas pelo PNSR, conforme a qualidade dos serviços de esgotamento sanitário em áreas rurais – estimando conforme a adaptação dos dados censitários do IBGE (2010), elaborado por FUNASA (2019b). Destaca-se que nesta adaptação elaborada por FUNASA (2019b), apenas a categoria “1a” é a categoria de área urbana, sendo os demais estimados como áreas rurais.

Figura 3 – Atendimento à coleta e tratamento de esgoto em áreas rurais.



FONTE: Funasa (2019b).

Nota-se que parte dos aglomerados rurais, em sua maioria, possuem soluções precárias de coleta e tratamento de esgotos domésticos, variando entre 52,5% e 63,0% conforme a categoria representativa (FUNASA, 2019b). Ainda, é notável as variações entre o atendimento adequado e a ausência de atendimento para as categorias de aglomerados. Aglomerados considerados rurais, mas próximos aos centros urbanos, e aglomerações adensadas isoladas possuem maior parte da população com atendimento adequado às formas de coleta e tratamento de esgoto doméstico – sendo 37,5% e 39,7%, respectivamente (FUNASA, 2019b). Contudo, nas aglomerações rurais menos adensadas e nos domicílios enquadrados na categoria “sem aglomerações”, há maior incidência de falta de atendimento aos serviços de coleta e tratamento de esgoto doméstico – sendo 21,8% e 33,9% da população, respectivamente.

Vale considerar que as informações apresentadas pelo PNSR demonstram que a falta de saneamento adequado às populações ocorre, com mais frequência, àqueles moradores de domicílios isolados – onde são dependentes, em sua maioria, de iniciativas próprias de soluções que cumpram com suas necessidades.

Como formas de atendimento adequado, FUNASA (2019b) indica a utilização de fossas sépticas, coleta e tratamento convencional, e fossas secas (no caso de indisponibilidade hídrica. Para a estimativa de domicílios rurais atendidos por coleta e tratamento convencional, trata-se da parcela de domicílios enquadrados como rurais, mas próximos à rede coletora, possibilitando a canalização do esgoto doméstico no tratamento convencional municipal (rede coletora, estações elevatórias, e estações de tratamento centralizado) (IBGE, 2011b; FUNASA, 2019a). Em relação às fossas sépticas e fossas secas, esta forma de tratamento de esgoto é relacionada à compartimentos escavados no solo, revestidos com materiais de construção civil, onde o esgoto doméstico permanece por tempo estabelecido em projeto para a degradação da matéria orgânica, remoção de nutrientes e organismos patogênicos existentes (IBGE, 2011b; FUNASA, 2019a) – sendo a diferença entre elas é que a fossa seca recebe os excretas humanos, não dispõe de veiculação hídrica como acontece na fossa séptica (FUNASA, 2019a).

Em relação ao atendimento precário de serviços de esgotamento sanitário, classificam-se os domicílios rurais onde há coleta de esgoto doméstico, mas este não é enviado para nenhum sistema de tratamento, além das fossas rudimentares (estruturas simplificadas de fossas sépticas, onde não há o revestimento da câmara de tratamento) (IBGE, 2011b; FUNASA, 2019a). Em relação às áreas não atendidas, tratam-se dos domicílios onde o esgoto doméstico é afastado por valas (a céu aberto) ou despejado diretamente em cursos d’água (rios, lagos ou mar), sem nenhum tratamento disponível (IBGE, 2011b).

De acordo com a Coordenadora da Câmara Técnica de Saneamento Rural da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Mônica Rodrigues, a falta de coleta e tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais (e também dos demais serviços que adentram o saneamento básico) acontece devido à: (i) viabilidade financeira; (ii) necessidade de soluções alternativas às soluções utilizadas em ambientes urbanos; e (iii) falta de formação de técnicos para trabalhar com as soluções alternativas e realizar a gestão dos sistemas em conjunto com a comunidade (MELO, 2019). Hosoi (2011) também destaca que uma das grandes dificuldades de levar saneamento básico para as áreas rurais e comunidades isoladas é a necessidade de estratégias diferentes das utilizadas em áreas urbanas, respeitando suas características sociais e naturais (HOSOI, 2011).

### 3.3. OS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS CAUSADOS PELA FALTA DE COLETA E TRATAMENTO DO ESGOTO DOMÉSTICO

A falta de sistemas adequados de coleta e tratamento de esgoto doméstico implica em uma série de fatores que desencadeiam impactos negativos à qualidade de vida, desenvolvimento econômico, e preservação ambiental. Ao mesmo tempo em que impactos negativos são recorrentes pela falta de sistemas adequados de coleta e tratamento de esgoto doméstico, impactos positivos são esperados quando há o acesso aos serviços de esgotamento sanitário pelos municípios.

A coleta e tratamento de esgoto doméstico como fator relevante para a qualidade de vida da sociedade é uma percepção existente desde as mais antigas populações e no processo de civilização da humanidade – quando esta relação foi identificada devido à má gestão destes serviços. Um dos principais casos registrados na história do saneamento básico, referente à relação entre saúde pública e esgoto doméstico, foi em 1854 quando John Snow comprovou cientificamente a associação da incidência de cólera com o consumo de água contaminada pelo esgoto doméstico, por meio de um mapeamento da ocorrência da doença e identificação da rede de distribuição de água que atendia a área afetada (ROSEN, 1994).

O acesso à coleta e tratamento de esgoto doméstico é fundamental para a garantia da saúde, segurança e bem estar da população, pois proporciona a redução de contaminação e disseminação de resíduos, patógenos e substâncias tóxicas por meio de veiculação hídrica (IBGE, 2011a). Em relação à coleta e tratamento de esgoto doméstico, a falta ou precariedade dos serviços estão associados a desafios como poluição ou contaminação de recursos hídricos

e disseminação de doenças de veiculação hídrica (doenças transmitidas pela água), ou doenças transmitidas pelo contato com as fezes. Tais doenças são classificadas pelo IBGE como Doenças Relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado (DRSAI). Destaca-se que o IBGE descreve saneamento ambiental como o “controle ambiental de vetores e reservatórios de doenças, a disciplina da ocupação e de uso da terra e obras especializadas para proteção e melhoria das condições de vida” (IBGE, 2011a).

Neste contexto, são consideradas DRSAIs: diarreias, febres entéricas, hepatite A, dengue, febre amarela, leishmanioses, filariose linfática, malária, doença de Chagas, esquistossomose, leptospirose, tracoma, conjuntivite, micoses superficiais, helmintíases, teníases (IBGE, 2011a), salmonelose, desintéria amébrica e giardíase (VESILIND; MORGAN, 2011). Tais doenças são todas evitáveis, visto que são causadas pela presença de organismos patogênicos em esgoto doméstico e, conseqüentemente, nas águas contaminadas por ele (VESILIND; MORGAN, 2011; VON SPERLING, 2014). Segundo o IBGE (2011a), com investimentos em saneamento e em ações preventivas de dispersão das doenças, é possível reduzir as taxas de internações hospitalares decorrentes.

Dentre os diversos tipos de microrganismos presentes em esgotos domésticos causadores de DRSAIs, destacam-se como os patógenos de maior interesse: *Salmonella*, *Shigella*, o vírus da hepatite, *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia*, *Escherichia coli* e *Cryptosporidium* (VESILIND; MORGAN, 2011). Von Sperling (2014) destaca que os principais grupos de organismos patogênicos de interesse para a saúde pública são as bactérias, os vírus, os protozoários e os helmintos. As DRSAIs de transmissão feco-oral (o organismo patogênico encontra-se na água contaminada por esgotos doméstico e é ingerido) associadas a cada grupo estão apresentadas na Tabela 2.

Pela dificuldade de detecção e quantificação de organismos patogênicos em esgoto doméstico, o indicativo da potencialidade da água examinada em transmitir doenças é por meio da quantificação dos organismos indicadores de contaminação fecal – bactérias do grupo coliforme (METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING, 2014). Bactérias do grupo coliforme são, principalmente, não patogênicas, mas auxiliam de forma satisfatória na avaliação de contaminação de fezes humanas na água examinada e, conseqüentemente, do potencial em transmitir doenças (VON SPERLING, 2014). Tal grupo é fortemente utilizado como indicativo de contaminação fecal, pois: (i) é presente em grande quantidade nas fezes humanas; (ii) é ligeiramente mais resistente do que as bactérias patogênicas; e (iii) sua remoção e a remoção de bactérias patogênicas são realizadas da mesma forma no tratamento de esgoto doméstico e no tratamento de água (VON SPERLING, 2014).

Tabela 2 – Organismos patogênicos e principais doenças de transmissão feco-oral associadas à água.

Organismo patogênico	Doença	Agente causal
Bactérias	Disenteria bacilar	<i>Shigella dysenteriae</i>
	Enterite por <i>Campylobacter</i>	<i>Campylobacter jejuni</i> , <i>Campylobacter coli</i>
	Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>
	Gastroenterite	<i>Escherichia coli</i>
	Leptospirose	<i>Leptospira</i> (várias espécies)
	Febre paratifóide	<i>Salmonella</i> (várias espécies)
	Salmonella	<i>Salmonella</i> (várias espécies)
	Febre tifóide	<i>Salmonella typhi</i>
Vírus	Hepatite infecciosa	Vírus da hepatite A
	Doenças respiratórias	Adenovírus (vários tipos)
	Gastroenterite	Enterovírus, Norwalk, Rotavírus, outros
	Meningite	Enterovírus
	Poliomielite	<i>Poliomyelitis virus</i>
Protozoários	Disenteria amebiana	<i>Entamoeba histolytica</i>
	Giardíase	<i>Giardia lamblia</i>
	Criptosporidiose	<i>Cryptosporidium</i>
	Balantidíase	<i>Balantidium coli</i>
Helmintos	Ascariíase	<i>Ascaris lumbricoides</i>
	Tricuríase	<i>Trichuris trichiura</i>

FONTE: Metcalf & Eddy (2003); Von Sperling (2014).

Neste contexto, os principais indicadores de contaminação fecal são: (i) Coliformes Totais (CT); (ii) Coliformes Fecais (CF), ou coliformes termotolerantes; e (iii) *Escherichia coli* (*E. Coli*) (METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING, 2014) – além de: (iv) *Klebsiella*; (v) bacteroides; (vi) estreptococos fecais; (vii) enterococo; (viii) *Clostridium perfringens*; e (ix) *P. aeruginosa* e *A. hydrophila* (METCALF & EDDY, 2003).

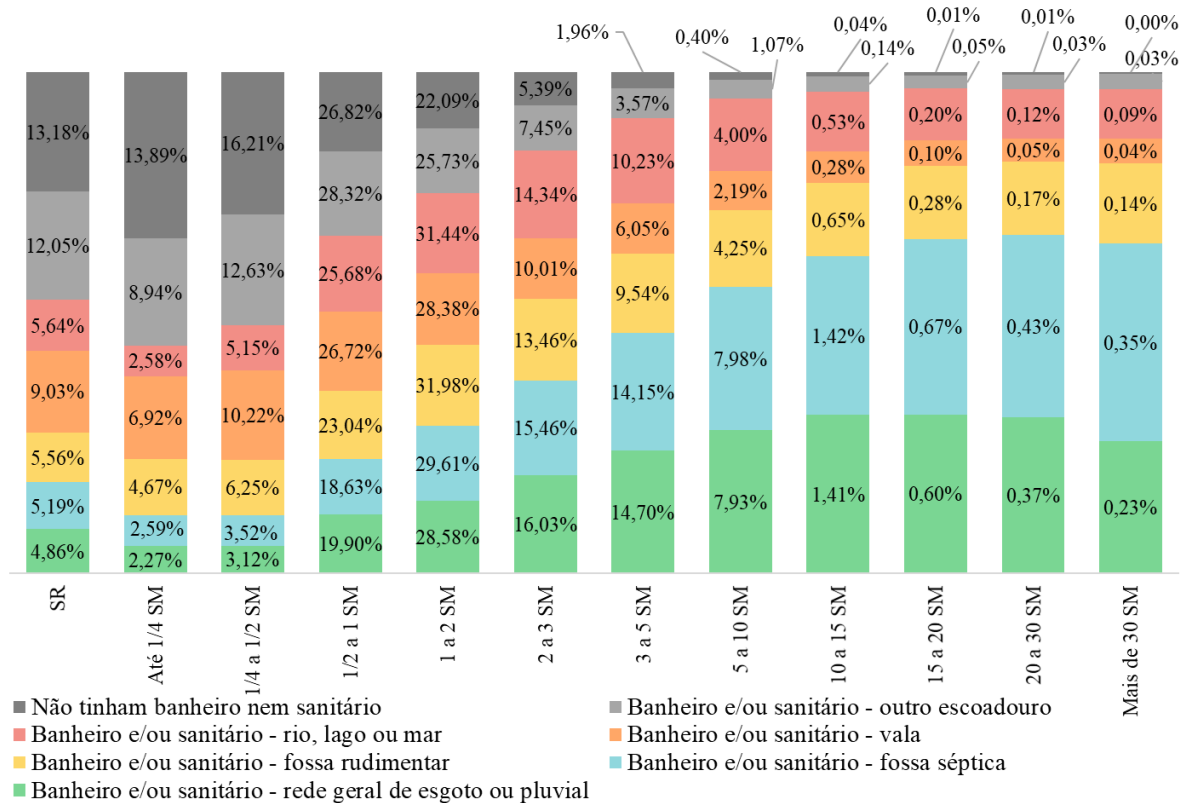
Diante da relação clara entre saúde pública e saneamento básico, a busca pela universalização dos serviços de saneamento e garantia da prestação de serviços com qualidade é essencial para o aumento na qualidade da saúde pública, o bem-estar da população e a manutenção de um ambiente saudável (IBGE, 2011a).

Além da problemática em relação à saúde pública, a falta de coleta e tratamento de esgoto também impacta no desenvolvimento econômico das localidades não atendidas de forma adequada pelos serviços de saneamento básico. Desigualdades regionais são encontradas com frequência, conforme a disponibilidade de acesso a um saneamento básico de qualidade (IBGE, 2011a). O Relatório do Desenvolvimento Humano do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) afirma tal relação, apresentando que a cobertura de atendimento com os serviços de distribuição de água potável e esgotamento sanitário em muitos países é, no

mínimo, 2 vezes maior para o quintil mais rico da população do que para o quintil mais pobre da população (PNUD, 2019).

No Brasil, os dados do Censo Demográfico do IBGE permitem relacionar a renda domiciliar mensal com as formas de coleta e tratamento de esgoto doméstico (quando há banheiro e/ou sanitário no domicílio) e a existência de banheiro e/ou sanitário (Figura 4). É notável que as formas de tratamento mais adequadas (rede de esgoto ou fossa séptica) estão presentes, em sua maioria, nos domicílios com maior renda domiciliar – enquanto os municípios com menor renda domiciliar estão suscetíveis às formas inadequadas de coleta e tratamento de esgoto e, em alguns casos, à não existência de banheiro e/ou sanitário. Destaca-se que o IBGE considera como banheiro os cômodos que possuem vaso sanitário e chuveiro, e considera como sanitário os cômodos que possuem apenas vaso sanitário (IBGE, 2011b).

Figura 4 – Relação entre coleta e tratamento de esgoto e a renda domiciliar mensal, a nível nacional.



NOTA: SR (sem rendimento); SM (salário mínimo).

FONTE: IBGE (2010).

Ainda, o PLANSAB apresenta que o *déficit* dos serviços de esgotamento sanitário é maior em população com menor rendimento domiciliar mensal e menor número de anos de estudo (MCIDADES, 2013). Scriptorre *et al.* (2015), por exemplo, avaliaram que aumentar o

acesso dos serviços de saneamento básico em 1%, permite: (i) um aumento de 0,11 pontos percentuais na taxa de frequência escolar (em crianças entre 6 e 14 anos); (ii) uma redução de 0,49 pontos percentuais na taxa de abandono escolar; e (iii) uma redução de 0,96 pontos percentuais na taxa de distorção idade-série no ensino fundamental.

É um ciclo, atualmente, sem fim. A população mais vulnerável financeiramente é a mais destinada a possuir em seus domicílios formas inadequadas de coleta e tratamento de esgoto – estando também, conseqüentemente, mais vulneráveis às doenças de transmissão feco-oral associadas à água contaminada por esgoto não tratado. Vulneráveis às DRSAIs, o rendimento escolar de crianças e jovens é afetado – sabendo que, doentes, estudantes deixam de comparecer às aulas, e suas funções cognitivas podem ser prejudicadas (NOKES *et al.*, 1992). Sem o estudo adequado, as chances de melhores oportunidades são reduzidas. Tal ciclo é facilmente interrompido com investimentos em saneamento básico: melhores condições de coleta e tratamento de esgoto doméstico significa uma redução de DRSAIs, um aumento no rendimento escolar, e uma redução na desigualdade social persistente no Brasil.

Em relação aos impactos ambientais, as substâncias presentes em esgoto doméstico podem proporcionar impactos negativos ao meio ambiente, conforme sua quantidade e qualidade. Consideram-se os nutrientes Nitrogênio e Fósforo, e a MO, como substâncias significativas contaminação de corpos hídricos.

Nitrogênio e Fósforo são substâncias indispensáveis para o metabolismo (crescimento) dos microrganismos responsáveis pela estabilização da MO presente em esgotos domésticos e, conseqüentemente, no seu tratamento. Contudo, em condições elevadas, a presença de Nitrogênio e Fósforo em águas contaminadas por esgoto doméstico conduz a um crescimento descontrolado de algas e plantas aquáticas, processo conhecido como a eutrofização de rios e lagos (tendo o Fósforo como fator limitante para tal ocorrência) (SANTOS, 2019). Destaca-se que tal fenômeno é um processo natural porque há a presença de nutrientes pelo próprio meio. Contudo, o processo em sua forma natural ocorre de forma lenta e equilibrada – o que não acontece quando o processo é acelerado devido ao despejo de esgoto doméstico *in natura* em corpos hídricos com concentrações elevadas dos nutrientes citados (VESILIND & MORGAN, 2011). De forma acelerada e desequilibrada, o processo de eutrofização de rios e lagos devido à presença de nutrientes originários de esgoto doméstico *in natura* desencadeia em diversos efeitos, como: impacto visual e odorífico, consumo de OD, mortandade de peixes, assoreamento, produção de toxinas no meio (SAWYER *et al.*, 2003; FUNASA, 2019a; SANTOS, 2019).

Em relação à MO, este é um dos parâmetros de maior importância na avaliação dos impactos causados pelo esgoto doméstico, visto que o processo metabólico que resulta na sua decomposição e estabilização se deve ao consumo de OD na água por microrganismos (VON SPERLING, 2014). Pelo consumo de OD durante a biodegradabilidade da MO, esgotos domésticos sem tratamento com altas taxas de DBO e DQO lançados em corpos hídricos podem ser nocivos ao meio, visto que, ocorrerá o consumo de OD existente no meio para a degradação da MO. Neste contexto, condições anaeróbias podem ser causadas em corpos hídricos, pela presença de esgotos domésticos com altas taxas de DBO e DQO (sem tratamento) (METCALF & EDDY, 2003; VESILING; MORGAN, 2011; VON SPERLING, 2014). Destaca-se que o consumo de OD também ocorre no processo de oxidação do Nitrogênio em corpos hídricos (SAWYER *et al.*, 2003).

#### 3.4. A GESTÃO DOS SERVIÇOS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO PARA O DESENVOLVIMENTO RURAL

Definido pela Lei Federal nº 11.445/2007, a Lei Nacional do Saneamento Básico (LNSB) é o marco legal do saneamento no Brasil (BRASIL, 2007). Recentemente atualizado pela Lei Federal nº 14.026/2020, o marco institui a coleta e tratamento de esgoto doméstico como parte dos serviços públicos de saneamento básico, o qual contempla o: (i) abastecimento de água potável; (ii) esgotamento sanitário; (iii) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos; e (iv) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (BRASIL, 2007; BRASIL, 2020).

Tais serviços são prestados de forma a garantir a universalização do acesso (ampliação progressiva ao saneamento básico em todos os domicílios ocupados), com: (i) integralidade, (ii) adequações à saúde pública e proteção do meio ambiente, (iii) atenção às peculiaridades locais e regionais, (iv) articulações com políticas públicas; (v) eficiência e sustentabilidade econômica; (vi) tecnologias apropriadas; entre outros princípios (BRASIL, 2007; BRASIL, 2020). Para o Decreto Federal nº 7.217/2010 – Decreto Regulamentador da LNSB – constituem os serviços de esgotamento sanitário as etapas de:

- a) **Coleta:** ligações prediais de conexão das economias (domicílios/residências) até o sistema de esgotamento sanitário (rede de coleta e transporte);
- b) **Transporte:** rede de esgoto doméstico até o sistema de tratamento;
- c) **Tratamento:** sistema de tratamento do esgoto doméstico às condições e padrões aceitáveis para o seu lançamento em corpos receptores; e

- d) **Disposição final:** disposição final adequada do esgoto doméstico tratado em corpos receptores, e do lodo originado no tratamento do esgoto em aterros sanitários ou soluções alternativas.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011a) afirma que para uma gestão adequada, é necessário avaliar o nível da eficiência, qualidade e de resposta à demanda de coleta e tratamento de esgoto doméstico, verificando a forma de prestação dos serviços, planejamento, além da existência de controle e fiscalização.

Como ferramenta de planejamento na gestão dos serviços, o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) é elaborado com base na Resolução Recomendada nº 75/2009 do Ministério das Cidades (MCIDADES) – atual Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) – a qual destaca que os mecanismos de gestão do saneamento básico devem incluir áreas rurais dispersas mediante a utilização de soluções compatíveis com os aspectos sociais e culturais do local (MCIDADES, 2009). Ainda, a atualização do marco legal do saneamento (LNSB) indica que fossas sépticas (uma das opções de solução utilizada para tratamento e disposição final de esgoto doméstico) integram os serviços públicos de esgotamento sanitário (BRASIL, 2020).

Apesar da existência de legislações que assegurem ações que visam melhorias na questão sanitária rural nacional, a falta de planejamento e gestão de recursos faz com que o investimento para a universalização dos serviços fique subutilizado, contribuindo para a ausência ou precariedade na prestação de serviços. Além disso, a falta de planejamento resulta em ações fragmentadas e não contínuas que causam o desperdício dos recursos financeiros e ineficiência dos sistemas (IBGE, 2011a).

Elaborado em 2013, o PLANSAB representa a gestão dos serviços públicos de saneamento básico a nível nacional, sendo uma das principais referências ao planejamento regional e local no setor. Partindo do diagnóstico dos serviços, o PLANSAB propõe objetivos e metas de universalização para o saneamento em seus quatro eixos (MCIDADES, 2013). Parte integrante do PLANSAB, o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) foi lançado em 2019 com o objetivo de fornecer diretrizes e estratégias para a universalização do saneamento (em seus quatro eixos) em áreas rurais brasileiras, áreas isoladas, comunidades tradicionais e povos indígenas (FUNASA, 2019b).

O PNSR tem como embasamento principal o fator de que soluções convencionais de coleta e tratamento de esgoto doméstico (as soluções coletivas que partem de rede coletora e forma de tratamento em grande escala) não são as mais indicadas para as áreas não urbanas consolidadas. Isto pois, em ambientes rurais a escala de projeto é ampliada, devido às distâncias

de uma residência à outra, enquanto a demanda (quantidade de esgoto doméstico gerado) é reduzida, devido à baixa densidade demográfica.

No contexto elaborado pelo PNSR, o Programa aborda como estratégias de expansão do saneamento rural: (i) a gestão dos serviços; (ii) a educação e participação social; e (iii) as soluções tecnológicas (FUNASA, 2019b). Relacionando os três eixos estratégicos do saneamento rural aos serviços de esgotamento sanitário, a implementação e operação de sistemas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais parte de alternativas de gestão condizente com as possibilidades existentes no meio, e dependente da participação social e capacitação de agentes públicos e sociedade civil para a gestão, implementação e operação eficaz dos serviços.

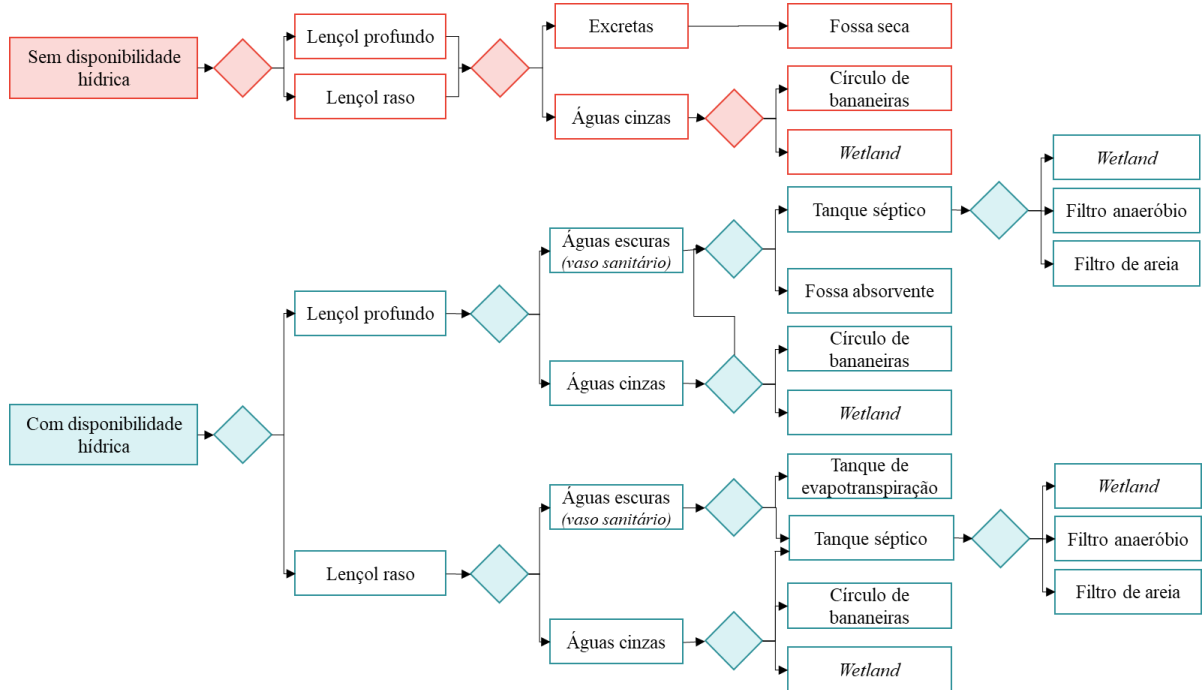
Realizar a gestão dos serviços em áreas rurais é um desafio, principalmente no que se refere aos direitos e responsabilidades dos munícipes e da Administração Pública. Pela distância das áreas rurais às sedes municipais, as localidades rurais e sua população acabam por, muitas vezes, ficar em segundo plano pela Administração Pública para atendimento às suas necessidades (ALVARENGA, 2020). Nestas situações, é recorrente a realização da autogestão – onde parte do próprio usuário ou comunidade, as ações de saneamento básico adequado, sem orientações e recursos financeiros e técnicos dos titulares dos serviços (FUNASA, 2019b). O PNSR defende que a autogestão não deve ser entendida como uma alternativa na gestão dos serviços – sendo uma forma de gestão inadequada, visto que não há apoio do Poder Público e, nem sempre, os moradores e a comunidade dispõem dos recursos técnicos e econômicos para o desenvolvimento das soluções em saneamento (FUNASA, 2019b). Sendo por este motivo tão importante o eixo de educação e participação social, para a sensibilização dos moradores rurais para a adequação no tratamento de esgoto, e a qualificação técnica básica para a operação do sistema (FUNASA, 2019b).

No eixo tecnologia, Funasa (2019b) fortalece a necessidade de utilização de soluções de coleta e tratamento de esgoto viáveis de serem implantadas em áreas rurais – de forma prática e capazes de atender efetivamente a demanda local. Assim, o PNSR apresenta matrizes tecnológicas para os quatro serviços do saneamento básico, a fim de nortear a implantação das infraestruturas de saneamento básico conforme a configuração do local. Estas matrizes foram elaboradas com base em soluções técnicas de situações típicas encontradas em áreas rurais brasileiras (FUNASA, 2019b).

No caso dos serviços de esgotamento sanitário, as soluções são divididas em individuais (Figura 5) e coletivas (Figura 6). Para as soluções individuais, o PNSR sugere a divisão entre regiões com e sem disponibilidade hídrica, uma subdivisão entre regiões com

lençol freático profundo e lençol freático raso e, ainda, uma subdivisão entre tratamento para águas escuras/excretas e água cinzas. Para as soluções coletivas, o PNSR indica sistemas que são utilizados em áreas com disponibilidade hídrica para a sua implantação (FUNASA, 2019b).

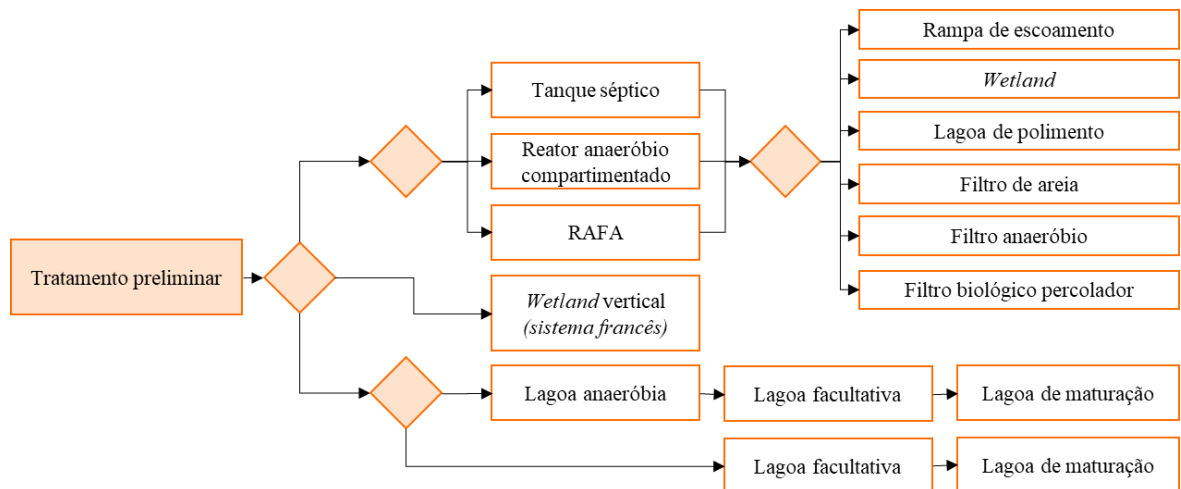
Figura 5 – Matriz tecnológica de soluções individuais de coleta e tratamento de esgoto, conforme PNSR.



NOTA: A matriz tecnológica do PNSR foi adaptada, por não considerar a disposição final do lodo gerado no tratamento. Para fossa seca em locais de lençol freático raso, utilizam-se opções impermeabilizadas.

FONTE: Adaptado de Funasa (2019b).

Figura 6 – Matriz tecnológica de soluções coletivas de coleta e tratamento de esgoto, conforme PNSR.

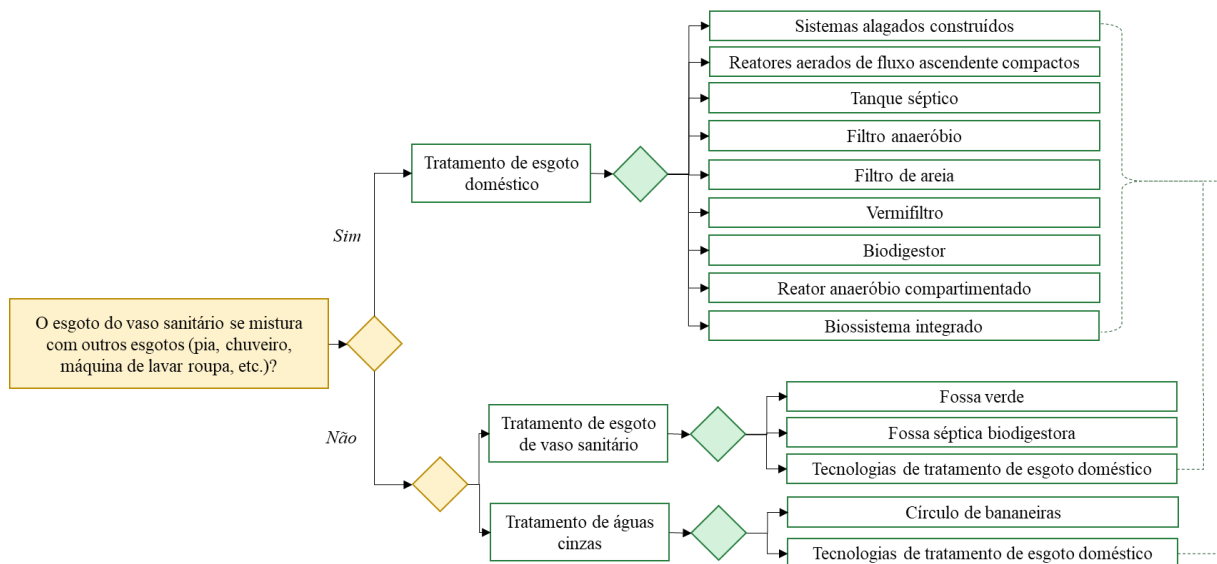


NOTA: A matriz tecnológica do PNSR foi adaptada, por não considerar a disposição final do lodo gerado no tratamento. RAFA (Reator anaeróbio de fluxo ascendente).

FONTE: Adaptado de Funasa (2019b).

Tonetti *et al* (2018), em sua publicação “Tratamento de Esgotos Domésticos em Comunidades Isoladas – Referencial para a escolha de soluções”, aborda 15 tecnologias para tratamento de esgoto domésticos viáveis de serem utilizadas em áreas rurais. Para que seja possível a escolha das soluções adequadas, Tonetti *et al* (2018) apresentou um fluxograma (Figura 7), em que é possível escolher a forma de tratamento de esgoto caso as águas escuras e cinzas se misturam, ou não. Nota-se que, a partir do fluxograma elaborado por Tonetti *et al* (2018), ainda se faz necessário avaliar o tipo de solo e nível do lençol freático antes de sua instalação (TONETTI *et al.*, 2018).

Figura 7 – Fluxograma para a escolha da alternativa para tratamento de esgoto em comunidades isoladas.



FONTE: Adaptado de Tonetti *et al* (2018).

É notável que seguindo o apresentado nas matrizes e fluxogramas acima, conforme a tomada de decisão – local e divisões do esgoto doméstico (águas escuras e águas cinzas) – várias opções podem ser escolhidas pelo usuário. Sabendo que diversas são as formas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais, e, dentre tantas possibilidades, como escolher a melhor configuração entre as opções disponíveis?

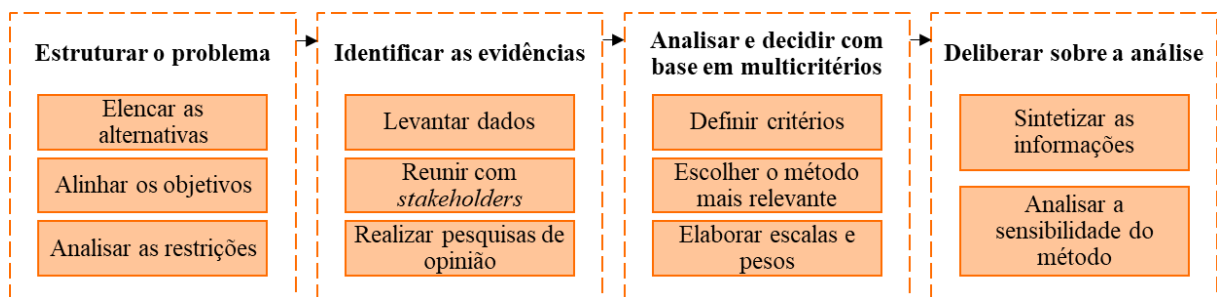
Ao serem analisados os fluxogramas disponíveis, observou-se que ainda falta um direcionamento estratégico de qual é a melhor solução dentre as possíveis de serem utilizadas, considerando as características qualitativas e quantitativas de cada uma: área, frequência de manutenção, simplicidade, eficiência na remoção de poluentes, etc. Neste contexto, metodologias de tomada de decisão podem ser adotadas para aprimorar a definição do melhor sistema de tratamento de esgoto doméstico (dentre as opções viáveis), onde seja possível avaliar

tanto dados qualitativos quanto dados quantitativos sobre os sistemas, atribuindo o grau de importância de cada dado e buscando a adoção do sistema de tratamento de esgoto doméstico que mais atenda ao esperado.

### 3.5. A ANÁLISE DE INDICADORES SOCIAIS, AMBIENTAIS E ECONÔMICOS E SEU AUXÍLIO NA TOMADA À DECISÃO

Para compreender a viabilidade de algo, os métodos de decisão multicritério são amplamente utilizados (VELASQUEZ; HESTER, 2013) – sendo um processo estruturante de tomada de decisão que permite selecionar alternativas por meio da avaliação de critérios quantitativos e qualitativos (VOROBIEV *et al.*, 2015). Sua estrutura básica de funcionamento encontra-se ilustrada na Figura 8. De acordo com Thokala e Duenas (2012), a implementação de um processo de decisão baseado em multicritérios parte da estruturação do problema e identificação das evidências – alinhando o que será analisado. Em seguida, realiza-se a análise e decisão multicritério para tomada de decisão da maneira mais relevante. Por fim, avalia-se os resultados obtidos e finaliza-se o processo de tomada de decisão com base na alternativa mais relevante entre as avaliadas (THOKALA; DUENAS, 2012).

Figura 8 – Estrutura básica de implementação de métodos de decisão multicritério para tomada de decisão.



FONTE: Adaptado de Thokala; Duenas (2012).

Existem diversos métodos de análise de dados qualitativos e quantitativos (análise multicritérios) – cada qual possui suas vantagens e desvantagens, e suas principais áreas de aplicação (Tabela 3). Apesar de diferentes formas de análise, os métodos tem, por fim, o mesmo objetivo: auxiliar o processo de tomada de decisão, avaliando diversas alternativas para a solução de um problema, permitindo identificar as alternativas prioritárias (principais) em relação ao problema estudado.

Tabela 3 – Métodos comumente usados em análises de diversos critérios qualitativos e quantitativos.

<b>Método</b>	<b>Áreas de aplicação</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
AHP	Gestão de recursos, políticas públicas, estratégica corporativas.	Fácil de usar e compor a hierarquia em diversos tipos de problema.	Interdependência entre critérios, inconsistência entre julgamentos.
CBR	Negócios, seguros de carro, medicina e projetos de engenharia.	Adaptável em mudanças, pouca manutenção.	Requer muitos casos, sensível à dados inconsistentes.
DEA	Economia, medicina, segurança de rotas, agricultura, negócios.	Trabalha com várias entradas e saídas, eficiência pode ser analisada.	Requer dados precisos (assume que todos os dados usados são conhecidos).
ELECTRE	Energia, economia, meio ambiente, gestão hídrica e de transporte.	Considera dados incertos e “vagos”.	Vantagens (ou não) das alternativas não são identificadas diretamente.
<i>Fuzzy Set Theory</i>	Engenharia, economia, meio ambiente, saúde, social, gestão.	Capaz de receber dados imprecisos e informações insuficientes.	Difícil de desenvolver e precisa de simulações para a sua utilização.
GP	Planejamento de produção, seleção de portfólio, gestão hídrica, escalas.	Fácil de utilizar para problemas de larga escala, e produz infinitas opções.	Associação com outro método para mensurar os coeficientes.
MAUT	Economia, finanças, ciências atuariais, gestão hídrica e energética, agricultura.	Considera incerteza no cálculo e permite incorporar preferências.	Precisa de muitos dados precisos de entrada.
PROMETHEE	Meio ambiente, hidrologia, negócios, finanças, química, logística e transporte.	Fácil de usar, não requer pressuposto de proporcionalidade dos critérios	Não proporciona um método claro de atribuição de pesos
SAW	Gestão de negócios, finanças, e gestão hídrica.	Cálculo requer programação de computadores, decisão intuitiva.	Resultados obtidos podem não ser reais e lógicos.
SMART	Meio ambiente, transporte e logística, problemas de fabricação e montagem.	Simple de usar, permite qualquer forma de atribuição de pesos.	Procedimento pode não ser adequado por conta da sua estrutura.
TOPSIS	Meio ambiente, gestão hídrica, engenharia, recursos humanos, negócios.	Fácil de usar e programar, processo simples.	Dificuldades no processo de ponderação, e consistência no julgamento.

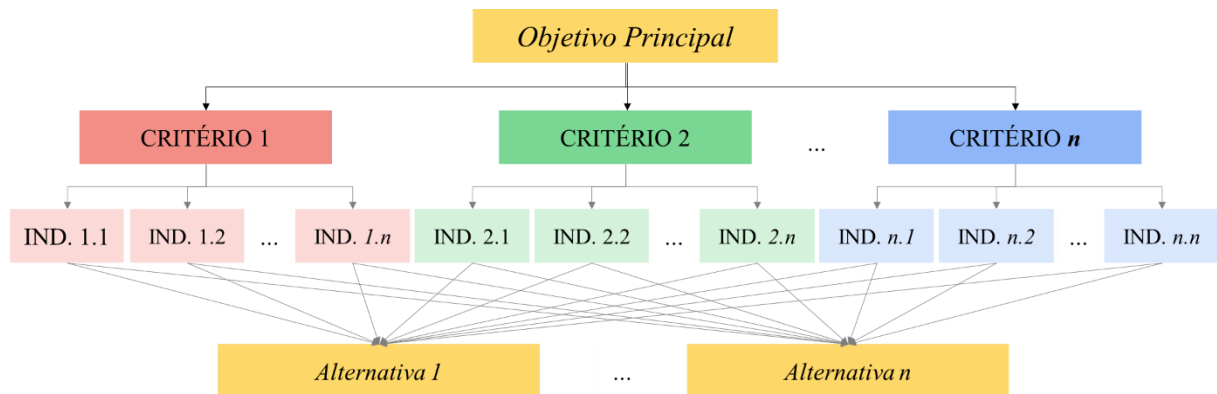
NOTA: Case-Based Reasoning (CBR); Data Envelopment Analysis (DEA); Goal Programming (GP); Multi-Attribute Utility Theory (MAUT); Simple Additive Weighting (SAW); Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART); Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS).

FONTE: Adaptado de Velasquez; Hester (2013).

Dentre os diversos métodos de análise multicritérios, o método de análise hierárquica – *Analytic Hierarchy Process* (AHP) – é amplamente utilizado para a análise de multicritérios (COSTA, 2002). Esta análise é baseada na comparação de critérios (por meio de julgamentos de acordo com a sua importância) de possíveis alternativas avaliadas, tendo como resultado um nível de hierarquia onde o peso de cada critério e valores de referência definem o seu grau de importância (SAATY, 1977).

De forma geral, o método AHP é estruturado conforme representa a Figura 9. O objetivo principal (problema) é avaliado com base em critérios que se dividem em subcritérios (aqui denominados indicadores) que integram o cálculo de cada alternativa possível de solucionar o problema. Assim, o processo de tomada de decisão é facilitado pela análise das alternativas e seus dados resultantes a partir do método AHP. A análise hierárquica é realizada na comparação nível a nível: (i) objetivo principal em relação aos critérios (peso de cada critério); (ii) cada critério em relação aos indicadores (peso de cada indicador); e (iii) cada indicador em relação à cada alternativa (peso de cada alternativa). O produto matricial dos pesos resultantes na comparação de cada nível permite a formação de uma hierarquia de alternativas que solucionam o problema (SAATY, 1977) – sendo que a de maior nota é a principal solução.

Figura 9 – Esquema representativo do método de análise hierárquica.



NOTA: IND (Indicador).

FONTE: Autoria própria (2021).

Partindo da estrutura básica apresentada na Figura 9, as etapas de cálculo do método AHP são apresentadas na Figura 10. Na identificação e escolha do objetivo a ser analisado, os critérios que fazem parte da análise são definidos – assim como os indicadores de cada critério. Envolve a tomada de decisão a identificação dos critérios mais determinantes no processo de análise, sendo então atribuídos pesos com base em julgamentos realizados.

Estes julgamentos são realizados em comparação em pares dos indicadores e critérios escolhidos, tendo como resultado uma matriz quadrada de dados  $n \times n$  que estabelecem a importância de um indicador comparado a outro (SAATY, 1977). Desta forma é possível responder à pergunta: *entre o indicador A e o indicador B, qual é mais importante, e com qual intensidade?*

Com base nos julgamentos realizados, os pesos de cada critério, indicador e alternativa são calculados de forma algébrica, cálculo de autovetores, onde um valor é referente ao peso de cada critério/indicador/alternativa. Com os pesos calculados, o produto matricial entre os autovetores permite gerar uma “nota” (valor final) para cada alternativa possível de solucionar o objetivo do estudo (SAATY, 1977). Por meio desta informação é possível identificar as soluções prioritárias com base nos julgamentos realizados.

Figura 10 – Estrutura básica de implementação de métodos de decisão multicritério para tomada de decisão.

1	Identificação da situação que necessita de tomada de decisão.
2	Escolha do objetivo principal da tomada de decisão.
3	Determinação dos critérios, indicadores e alternativas que irão satisfazer a tomada de decisão.
4	Atribuição de pesos, com base nos julgamentos do criador da decisão.
5	Análise da sensibilidade dos pesos e julgamentos realizados.
6	Desenvolvimento de cenários para obter informações para tomada de decisão.
7	Avaliação dos diferentes cenários e resultados.

FONTE: Adaptado de Kensarinovich (2014) *apud* Vorobiev *et al.* (2015).

Mesmo que não descrito por Velasquez e Hester (2013) que meio ambiente é uma das áreas de atuação do método AHP, diversos estudos encontrados na literatura demonstram o contrário. Sua metodologia já foi utilizada para a compreensão e análises de questões ambientais das mais variadas necessidades: (i) barragens de rejeitos de mineração (LOZANO, 2006); (ii) desenvolvimento sustentável (SANTOS *et al.*, 2019); (iii) gestão hídrica (SILVA; SOUZA, 2008; DELGADO-GALVAN *et al.*, 2010; CHEN *et al.*, 2015; BORZA; PRETESCU, 2016); (iv) erosão hídrica (RIBEIRO *et al.*, 2016); (v) agricultura sustentável (VEISI *et al.*, 2016); (vi) disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários (VASILJEVIC *et al.*, 2012; PAVANI *et al.*, 2019); (vii) tratamento de resíduos sólidos (TABOADA-GONZALEZ *et al.*, 2014); (viii) tratamento de efluente industrial (BOTTERO *et al.*, 2011; WEI *et al.*, 2020); (ix) formas de energia sustentável (CHATZIMOURATIDIS; PILAVACHI, 2009; KURKA, 2013; TIAN *et al.*, 2013); (x) localização de ETEs (KAYA, 2011; ANAGNOSTOPOULOS e

VAVATSIKOS, 2012; MASSEI *et al.*, 2014); (xi) alternativas de reuso de esgoto doméstico tratado (CHEIN *et al.*, 2014).

Em relação ao uso do método AHP para avaliações relacionadas à coleta e tratamento de esgoto, a aplicação do método AHP parte da avaliação e comparação entre sistemas de tratamento de esgoto, com a utilização de diversos indicadores de diferentes categorias: técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

Kellner *et al.* (2009) avaliaram a aplicação de indicadores de sustentabilidade em lagoas de estabilização. O método foi aplicado na comparação de três Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), envolvendo na avaliação dados e informações ambientais (parâmetros de qualidade do esgoto tratado), sociais (organização interna e externa), e econômico-financeiras (custos e arrecadação). As três ETEs comparadas de forma hierárquica foram a ETE Cajati (lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa), ETE Jacupiranga (lagoa facultativa convencional seguida de tanque de cloração) e ETE Pariquera-Açu (dois conjuntos de lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa) – localizadas na bacia do rio Ribeira do Iguape (SP).

Ouyang *et al.* (2015) utilizaram a metodologia AHP para avaliação de 5 diferentes tipos de tratamento de esgoto doméstico: infiltração rápida, infiltração lenta, escoamento superficial, SACs, e lagoas de estabilização. Para a realização da análise, foram utilizados 14 indicadores divididos entre os critérios econômico (custos e área), ambiental (eficiência do tratamento e risco hidrogeológico), ecológico e de gestão (manutenção e disponibilidade de espaço), e técnico (requisitos e impactos externos).

Pereira *et al.* (2019) avaliaram diferentes formas de tratamento de esgoto descentralizados em áreas rurais e isoladas, sendo o sistema de tanque séptico associado a pós-tratamento (filtro anaeróbio, vala de infiltração, sumidouro, canteiro de infiltração de evapotranspiração ou círculo de bananeiras), fossa séptica biodigestora, fossa séptica econômica ou tanque de evapotranspiração. Foram utilizados 15 indicadores na análise (tanto técnicos, quanto econômicos e ambientais), mas sem a sua separação por critérios de sustentabilidade. O método foi implantado para cada indicador separadamente, sem o cálculo de uma nota geral de hierarquia para cada sistema (avaliação dos indicadores em conjunto).

Sanches (2009) aplicou o método AHP para avaliação de três alternativas de tratamento de esgoto para a ampliação programada da ETE Araçá, localizada em Capão de Canoa (RS): (i) reator anaeróbio de leito fluidizado seguido de sistemas alagados construídos de fluxo superficial; (ii) lagoas de estabilização (facultativa e maturação) seguidas de sistemas alagados construídos de fluxo superficial; e (iii) lodos ativados de aeração prolongada seguidos de desinfecção. As alternativas foram avaliadas de forma sustentável, com critérios econômicos

(custo total), social (impacto social interno e externo), e ambiental (potencial de acidificação, eutrofização, toxicidade, contaminação orgânica e aquecimento global).

Sun *et al.* (2020) avaliaram a sustentabilidade de diferentes formas de coleta e tratamento de esgoto (tanto centralizados quanto descentralizados). Como sistemas centralizados de coleta e tratamento de esgoto foram avaliados lodo ativado, e biorreatores de membrana. De forma descentralizada, avaliou-se os reatores de manta de lodo e fluxo ascendentes (para águas escuras) e filtros biológicos descentralizados (para águas cinzas), e de forma híbrida, o reator de manta de lodo foi avaliado em conjunto de filtros biológicos centralizados. Foram avaliados aspectos econômicos, sociais e ambientais, tendo como indicadores: emissões de carbono, eutrofização, custos e resiliência.

Molinos-Selante *et al.* (2014) também utilizou o método para a avaliação dos seguintes sistemas: alagados construídos, lagoas de estabilização, aeração prolongada, biorreator de membrana, contator biológico rotativo, filtro biológico e reator em batelada sequencial. As ETEs avaliadas foram escolhidas com base na população atendida (1.500 habitantes) e capacidade de tratamento (400 m<sup>3</sup>/dia), existentes na Espanha. Assim, os dados utilizados foram dados da literatura, dados reais de ETEs espanholas, e informações dadas por especialistas. Os autores avaliaram a sustentabilidade de cada sistema nas três dimensões – econômica (custos), social (odor, ruído, e impactos sociais) e ambiental (eficiência do sistema, consumo de energia, área, e potenciais de reaproveitamento).

Lima *et al.* (2020) utilizou de critérios de dimensão ambiental (eficiência), operacional (manutenção e operação) e social (informações do entorno) para a avaliação de cinco ETEs existentes no Ceará, sendo: (i) ETE Conjunto Ceará, com lagoas facultativas em paralelo; (ii) ETE Conjunto Esperança, com uma lagoa facultativa; (iii) ETE Novo Morumbi II, com reator *UASB* e desinfecção; (iv) ETE Parque Fluminense, com uma lagoa anaeróbia, uma lagoa facultativa e uma lagoa de maturação em série; e (v) ETE Sumaré, com quatro decantodigestores e quatro filtros anaeróbios e desinfecção. Dentre as dimensões de critérios, 14 indicadores foram classificados dentre as dimensões e utilizados na análise hierárquica.

Com base no apresentado acima, a Tabela 4 sintetiza os principais indicadores utilizados para cada estudo citado onde já foram avaliados sistemas de tratamento de esgoto doméstico por meio da metodologia AHP. Para cada indicador, foi anotado a dimensão da sustentabilidade em que foi integrado para o respectivo estudo – exceto em Pereira *et al.* (2019), onde os indicadores não foram classificados em critérios.

Tabela 4 – Principais indicadores utilizados em métodos de análise hierárquica de sistemas de tratamento de esgoto doméstico.

Indicadores	Kellner <i>et al.</i> (2009)	Ouyang <i>et al.</i> (2015)	Pereira <i>et al.</i> (2019)	Sanches (2009)	Sun <i>et al.</i> (2020)	Molinos-Selante <i>et al.</i> (2014)	Lima <i>et al.</i> (2020)
Aceitação pública	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC	✗ -
Área necessária	✗ -	✓ ECO	✓ NI	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Assoreamento/Presença de resíduos	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ OPE
Características do solo	✗ -	✗ -	✓ NI	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Confiabilidade	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Complexidade	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC	✗ -
Consumo de energia	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Custo de capital	✗ -	✓ ECO	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Custo de investimento/implantação	✗ -	✗ -	✓ NI	✗ -	✗ -	✓ ECO	✗ -
Custos de operação	✗ -	✓ ECO	✓ NI	✗ -	✗ -	✓ ECO	✗ -
Custo total	✓ ECO	✗ -	✗ -	✓ ECO	✓ ECO	✗ -	✗ -
Descarte inadequado de lodo	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ OPE
Despesa média por funcionário	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Ligações prediais de esgoto	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC
Efeitos sazonais/climáticos	✗ -	✓ CEG	✓ NI	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Impacto visual	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC	✗ -
Impacto social interno/externo	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -
Índice de desenvolvimento humano	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC
Intensidade de emissões de carbono	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -
Manutenção/Operação	✗ -	✓ CEG	✓ NI	✗ -	✗ -	✗ -	✓ OPE
Mau desempenho da desarenação	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ OPE
Metodologia construtiva	✗ -	✗ -	✓ NI	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Nitrogênio amoniacal final	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Acidentes de trabalho/Segurança	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ OPE
Atuações do órgão ambiental	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -

Indicadores	Kellner <i>et al.</i> (2009)	Ouyang <i>et al.</i> (2015)	Pereira <i>et al.</i> (2019)	Sanches (2009)	Sun <i>et al.</i> (2020)	Molinos-Selante <i>et al.</i> (2014)	Lima <i>et al.</i> (2020)
Reuniões com organizações externas	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Oxigênio dissolvido final	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Odores/Produção de gases	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC	✓ OPE
pH final	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB
População atendida	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Potencial de acidificação	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -
Potencial de aquecimento global	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -
Potencial de eutrofização	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✓ AMB	✗ -	✗ -
Potencial de toxicidade	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -
Produção de lodo	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Remoção de DBO <sup>1</sup>	✓ AMB	✓ AMB	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -
Remoção de DQO <sup>1</sup>	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✓ AMB
Remoção de Fósforo total <sup>1</sup>	✓ AMB	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Remoção de microrganismos <sup>1</sup>	✓ AMB	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB
Remoção de nitrogênio total <sup>1</sup>	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Remoção de sólidos suspensos totais <sup>1</sup>	✗ -	✓ AMB	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✓ AMB
Resiliência	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC	✗ -	✗ -
Ruídos	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ SOC	✗ -
Potencial de recuperação de produtos	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Potencial para reuso	✗ -	✗ -	✓ NI	✗ -	✗ -	✓ AMB	✗ -
Risco hidrogeológico	✗ -	✓ AMB	✓ NI	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Tarifa média praticada	✓ SOC	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -
Volume de tratamento	✗ -	✗ -	✓ NI	✗ -	✗ -	✗ -	✗ -

NOTA: AMB (Ambiental), CEG (Ecológico e de gestão), ECO (Econômico), NI (Não informado), OPE (Operacional), SOC (Social), TEC (Técnico).

NOTA: <sup>1</sup>Refere-se à utilização de indicadores de eficiência de remoção (%) ou o parâmetro final do esgoto tratado (em mg/L).

FONTE: Autoria própria (2021).

São inúmeros os indicadores possíveis de serem utilizados na comparação de sistemas de tratamento de esgoto doméstico. Ainda, conforme a síntese de indicadores na Tabela 4, nota-se que um indicador pode ser classificado em diferentes critérios – a depender do julgamento e entendimento dos autores do estudo.

Alguns destaques podem ser realizados com os estudos apresentados acima. De acordo com os resultados obtidos por Ouyang *et al.* (2015), as melhores opções de tratamento (de maior nota) variavam conforme os pesos atribuídos nos índices e critérios adotados. Os autores também indicam o método para avaliação de outras formas de sistema de tratamento de esgoto doméstico.

Molinos-Selante *et al.* (2014) utilizaram estudos já existentes na literatura (outros estudos práticos), além de informações reais de ETEs e especialistas, para a coleta de dados necessárias para a avaliação hierárquica pelo método AHP.

Kellner *et al.* (2009), Sanches (2009), Molinos-Selante *et al.* (2014), Ouyang *et al.* (2015), e Lima *et al.* (2020) avaliaram sistemas centralizados de tratamento de esgoto doméstico – sistemas complexos existentes nas áreas urbanas municipais.

Sun *et al.* (2020) avaliaram a comparação entre sistemas centralizados, sistema descentralizado e sistema híbrido. Na avaliação dos autores, o sistema descentralizado e o sistema híbrido possuíam maiores custos em coleta de esgoto, maiores potenciais de eutrofização, menores custos em tratamento, e menores emissões de carbono. Na avaliação de cenários, Sun *et al.* (2020) priorizaram, em diferentes rodadas do método, cada um dos indicadores utilizados. Destaca-se que o sistema descentralizado esteve como prioridade (melhor opção) em menor intensidade de emissões de carbono e resiliência (capacidade de recuperação), além de ser a melhor opção também no cenário onde os quatro indicadores possuem mesmo peso (SUN *et al.*, 2020).

Pereira *et al.* (2019) utilizaram de indicadores para avaliação de sistemas descentralizados (para utilização em áreas rurais e isoladas). Mota (2017) utilizou os indicadores propostos por Molinos-Selante *et al.* (2014) para a aplicação em sistemas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais.

Visto a possibilidade de comparação entre informações qualitativas e quantitativas para a resolução de um problema, o método AHP demonstra ser satisfatório para cumprir com a análise de diversas informações que envolvam a escolha do método de coleta e tratamento de esgoto a ser implementado. Assim, este método serviu de base para a comparação dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico avaliados na área de estudo, como será apresentado na sequência.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem metodológica para a avaliação da viabilidade técnica-econômica, social e ambiental de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais consiste, aqui neste estudo, na aplicação de um método que possibilite a estruturação das possíveis alternativas em uma forma hierárquica, para a tomada de decisão.

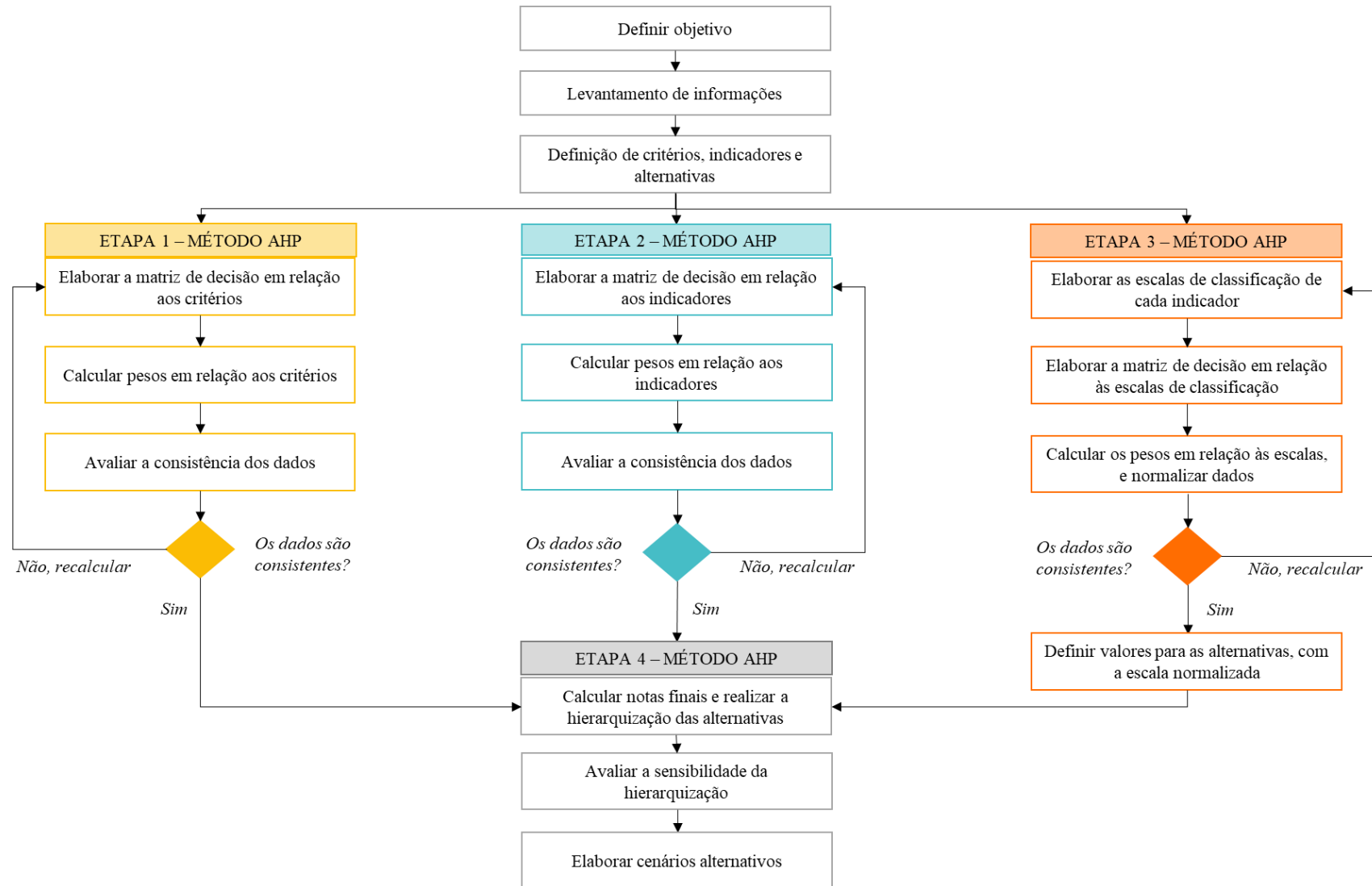
O método de análise hierárquica AHP, citado anteriormente, é uma prática que permite esta avaliação. Por meio de dados qualitativos e quantitativos das possíveis alternativas de tratamento de esgoto doméstico existentes nas áreas rurais, realizam-se julgamentos para a priorização das informações existentes. A partir desta priorização de dados, a hierarquização é realizada.

Neste contexto, a Figura 11 apresenta o processo metodológico utilizado neste estudo. Tem-se como objetivo definido avaliar – dentre aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais – as principais formas de tratamento de esgoto doméstico possíveis de serem utilizadas em áreas rurais brasileiras. Com o objetivo definido, foi realizado o levantamento de dados e informações sobre estudos de caso e projetos piloto de sistemas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais – sistemas estes que podem ser utilizados tanto de forma individual quanto de forma coletiva (a depender das características de construção).

A partir dos dados e informações utilizados, a avaliação da viabilidade técnico-econômica, social e ambiental começou a tomar forma, com a seleção dos critérios, indicadores e alternativas para a análise de forma hierárquica.

Todo o passo a passo utilizado na metodologia está descrito nos itens, a seguir.

Figura 11 – Processo metodológico utilizado na elaboração deste estudo.



FONTE: Autoria própria (2021).

#### 4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS E INFORMAÇÕES

O levantamento das informações das alternativas deu-se pela revisão da literatura (busca por dados e informações já publicados anteriormente). Sendo o objetivo principal deste estudo a avaliação dos sistemas de tratamento existentes, dados reais em relação à remoção de poluentes em esgoto doméstico formaram a base de informações necessárias para a aplicação do método AHP. Assim, para o levantamento de informações foram feitas as seguintes etapas:

- a) **Definição da área de estudo:** definiu-se a região em que seriam pesquisadas as formas de tratamento de esgoto existentes;
- b) **Definição dos sistemas de tratamento de esgoto:** com base nas formas de tratamento encontradas na área de estudo, os tipos de sistemas de tratamento de esgoto encontrados (com base em estudos de caso projetos piloto em Universidades) foram agrupados conforme o princípio tecnológico;
- c) **Definição dos critérios, indicadores e dados para a análise hierárquica:** com base nos tipos de sistemas de tratamento de esgoto encontrados, os dados foram levantados para cada indicador da análise hierárquica.

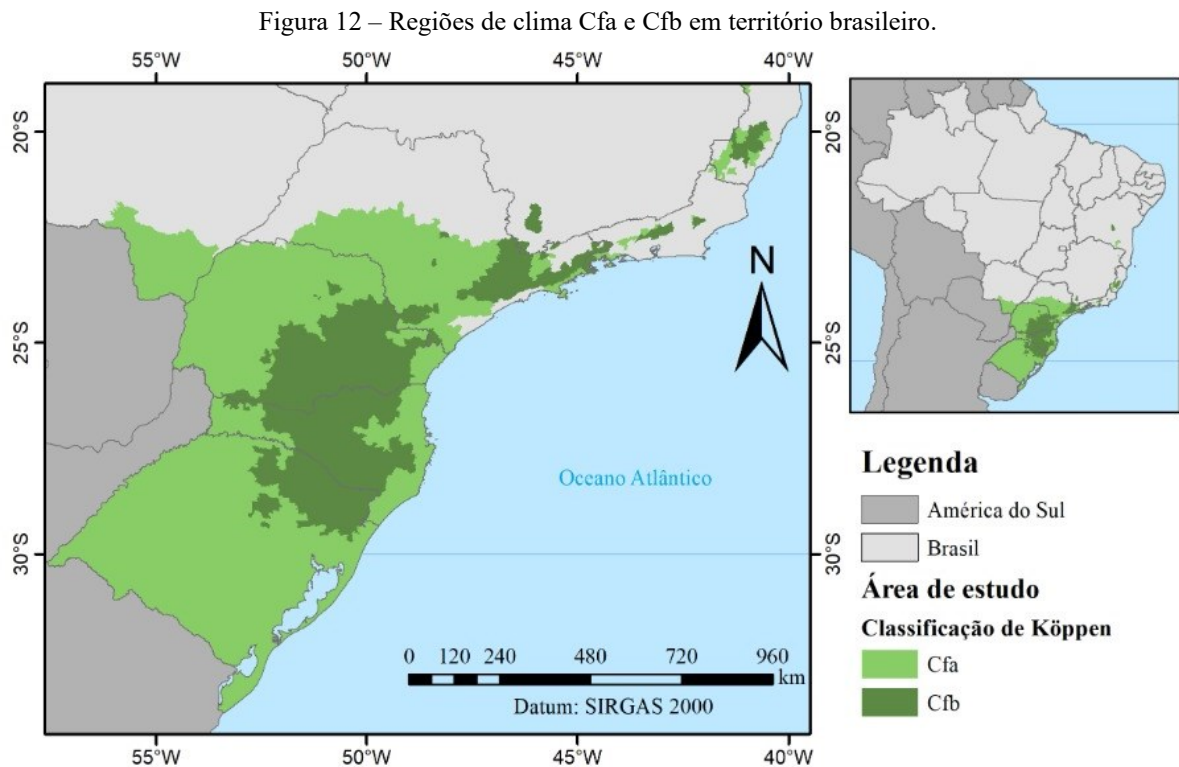
##### 4.1.1. Área de Estudo

O fator clima é um grande influenciador na remoção de poluentes em esgotos domésticos, principalmente em sistemas de tratamento de esgoto de princípio biológico (onde microrganismos realizam a degradação da matéria orgânica). Segundo Metcalf & Eddy (2003), dentre os aspectos climáticos, a temperatura é um grande influenciador em sistemas de tratamento biológicos, principalmente, visto que a variação da temperatura no ambiente interfere nas taxas de reações do processo e também no crescimento microbiológico.

Sendo assim, optou-se, para este estudo, regionalizar a avaliação dos sistemas de tratamento de esgoto existentes em municípios pertencentes da zona de clima subtropical úmido onde não há estação de seca (com chuvas o ano todo), representada pela sigla Cf na classificação climática de Köppen (ALVAREZ *et al.*, 2013). Uma subdivisão ainda pode ser feita na zona climática Cf de acordo com a temperatura local, sendo: (i) Cfa: a zona de verão quente (temperaturas acima de 22 °C, para o mês mais quente); e (ii) Cfb: a zona de verão temperado

(temperaturas abaixo de 22 °C, para o mês mais quente, com temperaturas acima de 10 °C em pelo menos quatro meses) (ALVAREZ *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2015).

A Figura 12 apresenta a região da área de estudo, conforme destacado anteriormente. No levantamento dos dados e informações, foram selecionados tanto estudos na região de clima Cfa quanto na região de clima Cfb.



FONTE: Alvarez *et al.* (2013), elaborado pela Autora (2021).

#### 4.1.2. Definição dos Sistemas de Tratamento de Esgoto Doméstico em Áreas Rurais

A plataforma da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) chamada de Periódico CAPES, além das bases *Google Scholar*, *Science Direct*, *Web of Science*, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), e Anais de Congressos da Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária (ABES), foram utilizadas para a pesquisa a respeito de sistemas de tratamento de esgoto doméstico. Foram utilizadas palavras-chave, como: *saneamento rural*, *eficiência de tratamento*, *área rural*, *tratamento de esgoto doméstico*, *saneamento* – tanto em Língua Inglesa quanto em Língua Portuguesa, para a busca.

Foram selecionados tanto estudos de caso em áreas rurais e/ou comunidades isoladas quanto projetos piloto em universidades, visando a avaliação de sistemas alternativos para a

descentralização do tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais e isoladas. Foram utilizadas como base de busca, os sistemas de tratamento indicadas por Tonetti *et al.* (2018) e por FUNASA (2019b), contemplando (em uma única etapa ou diversas etapas): (i) SAC: Sistemas alagados construídos; (ii) RAF: Reator anaeróbio de fluxo ascendente; (iii) TSE: Tanque séptico; (iv) FAN: Filtro anaeróbio; (v) FAR: Filtro de areia; (vi) VER: Vermifiltro; e (vii) RAC: Reator anaeróbio compartimentado. Com base nos tipos de sistemas encontrados, foram classificados e categorizados como alternativas para a análise hierárquica aqui proposta.

Destaca-se que a avaliação se refere à viabilidade de sistemas de tratamento de esgoto doméstico em sua integridade (em domicílios onde não há separação de águas cinzas e escuras).

#### 4.1.3. Definição dos Critérios, Indicadores e Dados para a Avaliação Hierárquica dos Sistemas

Diversos são os fatores que podem ser utilizados na análise de sistemas de tratamento de esgoto doméstico. Partindo da relação de informações proposta por Molinos-Senante *et al.* (2014), os critérios e indicadores utilizados neste estudo estão apresentados na Tabela 5. Sendo a avaliação hierárquica elaborada para sistemas simplificados de tratamento de esgoto doméstico, os dados foram definidos, principalmente, pela disponibilidade de informação.

Tabela 5 – Relação de critérios e indicadores utilizados na avaliação da viabilidade.

<b>Critério</b>	<b>Código</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidade</b>
<b>Técnico-econômico (CTE)</b>	ITE01	Área necessária	m <sup>2</sup> /hab
	ITE02	Custo de implantação	R\$/hab
	ITE03	Frequência de manutenção	Qualitativo
<b>Ambiental (CAM)</b>	IAM01	Eficiência na remoção de DBO	%
	IAM02	Eficiência na remoção de DQO	%
	IAM03	Eficiência na remoção de CT	unid. log
	IAM04	Eficiência na remoção de SST	%
	IAM05	Eficiência na remoção de N <sub>am</sub>	%
	IAM06	Eficiência na remoção de N <sub>total</sub>	%
	IAM07	Eficiência na remoção de P <sub>total</sub>	%
<b>Social (CSO)</b>	ISO01	Simplicidade	Qualitativo
	ISO02	Odor desagradável	Qualitativo
	ISO03	Proliferação de insetos e vermes	Qualitativo

NOTA: CT (Coliformes totais); SST (Sólidos suspensos totais); N<sub>am</sub> (Nitrogênio amoniacal); N<sub>total</sub> (Nitrogênio total); P<sub>total</sub> (Fósforo total).

FONTE: Autoria própria (2021).

A utilização dos três critérios permite a avaliação dos sistemas de forma sustentável, sendo considerados aspectos econômicos, ambientais e sociais. Aspectos técnicos (área necessária e frequência de manutenção) foram incluídos ao indicador econômico (custos de implantação) para a avaliação conjunta destes dados. Para cada indicador utilizado, dados foram atribuídos com base nas referências encontradas – estes foram tratados de forma a manter a máxima padronização e relação entre eles. Para o critério ambiental, utilizaram-se os dados publicados nas referências (dados reais de estudos de caso e projetos piloto), enquanto para o critério técnico-econômico e social foram utilizados dados padrões da literatura, sendo:

#### - Dados e Informações para o Critério Técnico-Econômico:

Para os indicadores ITE01, ITE02 e ITE03 foram utilizados, principalmente, os dados apresentados por Tonetti *et al.* (2018), conforme Tabela 6. Os dados de área e custo são referentes à sistemas que atendem até 5 pessoas (TONETTI *et al.*, 2018). Sendo assim, estes dados foram divididos por 5, para a utilização no indicador ITE01 e ITE02 por habitante.

Tabela 6 – Referencial utilizado para os indicadores técnico-econômicos da avaliação hierárquica.

Alternativa	Área (m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> /hab)	Custo (R\$)	Custo (R\$/hab)	Frequência de manutenção (vezes/ano)
SAC	-	-	1.500,00 – 2.500,00	300,00 – 500,00	2 a 4 (Médio)
RAF	1,5 a 4	0,3 – 0,8	1.500,00 – 2.500,00	300,00 – 500,00	2 a 4 (Médio)
TSE	1,5 a 4	0,3 – 0,8	500,00 – 1.500,00	100,00 – 300,00	1 (Baixo)
FAN	1,5 a 4	0,3 – 0,8	500,00 – 1.500,00	100,00 – 300,00	1 (Baixo)
FAR	2 a 5	0,4 – 1,0	500,00 – 1.500,00	100,00 – 300,00	5 ou mais (Alto)
VER	2 a 4	0,4 – 0,8	500,00 – 1.500,00	100,00 – 300,00	5 ou mais (Alto)
RAC	3 a 8	0,6 – 1,6	1.500,00 – 2.500,00	300,00 – 500,00	1 (Baixo)

FONTE: Tonetti *et al.* (2018).

Referente à SAC, Dotro *et al.* (2017) apresentam dados de área, conforme o fluxo de tratamento, sendo: (i) 3,0 a 4,0 m<sup>2</sup>/hab para SAC de fluxo vertical; e (ii) 5,0 a 10,0 m<sup>2</sup>/hab para SAC de fluxo horizontal. Para este tipo de tratamento, estes dados foram utilizados.

Em várias configurações de tratamento avaliados, há a utilização de duas ou mais etapas. Assim, para sistemas com mais que uma etapa em sua configuração, os dados (valores mínimos e máximos) de área e custos foram somados.

Em relação à frequência de manutenção, considerou-se, pela informação de cada etapa separadamente, a média de vezes em que se deve realizar manutenção no sistema. Assim, definiu-se essa estimativa por dados qualitativos, informando a frequência de manutenção como: Muito Baixa; Baixa; Moderada; Alta; e Muito Alta.

**- Dados e Informações para o Critério Ambiental:**

Na busca de sistemas de tratamento de esgoto doméstico para áreas rurais (item 4.1.2), os dados referentes à eficiência do tratamento foram coletados para a composição dos indicadores ambientais. Os resultados da busca estão apresentados de forma detalhada no APÊNDICE A (apresentando os dados desmembrados de cada referência utilizada). Na maioria dos sistemas avaliados mais de uma referência foi encontrada, assim as informações utilizadas na análise hierárquica são as médias das eficiências encontradas para o respectivo indicador. Destaca-se que o desvio padrão apresentado é referente à média calculada neste estudo – os desvios padrões de cada referência foram desconsiderados.

Alguns ajustes foram necessários nos dados encontrados. Em alguns estudos, haviam os dados de entrada e saída para o indicador, então a eficiência foi calculada pela Equação 1.

$$Ef. (\%) = \frac{([C]_{inicial} - [C]_{final})}{[C]_{inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Já outros, apresentavam informações apenas referente ao pós-tratamento (por exemplo, o estudo avaliava um sistema composto por TSE e FAN, mas os dados eram referentes à etapa de FAN). Nestes casos, utilizou-se os valores médios de Von Sperling (2014) para a primeira etapa, e a eficiência global foi calculada pela Equação 2.

$$Ef. global (\%) = 1 - [(1 - E_1) \times (1 - E_2) \times \dots \times (1 - E_n)] \quad (2)$$

Como alguns estudos não apresentavam dados para todos os indicadores adotados, as faixas de valores de eficiência de remoção de Von Sperling (2014) foram adotadas (Tabela 7), calculando pela eficiência global se na configuração havia mais de uma etapa.

Tabela 7 – Referencial utilizado para os indicadores ambientais da avaliação hierárquica.

Alternativa	Remoção de DBO (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de SST (%)	Remoção de N <sub>am</sub> (%)	Remoção de N <sub>total</sub> (%)	Remoção de P <sub>total</sub> (%)	Remoção de CT (unid. log)
TSE	30 – 35	25 – 35	55 – 65	< 30	< 30	< 35	< 1
SAC	80 – 90	75 – 85	87 – 93	< 50	< 60	< 35	-
TSE + FAN	80 – 85	70 – 80	80 – 90	< 45	< 60	< 35	1 a 2
RAF	60 – 75	55 – 70	65 – 80	< 50	< 50	< 35	~1
RAF + FAN	75 – 87	70 – 80	80 – 90	< 50	< 60	< 35	1 a 2

FONTE: Von Sperling (2014).

Por fim, em relação à remoção de CT, vários estudos indicavam a eficiência de remoção na unidade de porcentagem, e esta foi transformada para a escala logarítmica (Equação 3). Assim, manteve-se um padrão na forma de apresentação dos dados.

$$\text{Remoção (unid. log)} = -\log(1 - \text{Eficiência}) \quad (3)$$

Dotro *et al.* (2017) também teve seus dados utilizados referentes à remoção de CT para SAC – o qual varia de acordo com o fluxo de afluente adotado. Para os SACs de fluxo vertical a remoção média de CT é de 2 a 4 unid. log, e para SACs de fluxo horizontal a remoção média de CT é de 2 unid. log (DOTRO *et al.*, 2017).

Com estes ajustes, a maior possibilidade de arranjos e dados foi contemplada na avaliação, utilizando informações da literatura e informações obtidas na construção e avaliação de sistemas.

#### - Dados e Informações para o Critério Social:

Para a integração do critério social, os indicadores ISO01, ISO02 e ISO03 foram completados adaptando a avaliação relativa de Von Sperling (2014) (Tabela 8). Considerando os dados de Von Sperling (2014), os dados dos indicadores de cada sistema de tratamento contemplado na avaliação hierárquica foram estimados, conforme similaridade no processo de tratamento. Para sistemas com mais de uma etapa, considerou-se o conjunto de dados, adaptando a escala caso a caso.

Seguindo a escala adotada para frequência de manutenção, para os indicadores sociais, a escala foi elaborada de forma qualitativa: Muito Baixa; Baixa; Moderada; Alta; e Muito Alta.

Tabela 8 – Referencial utilizado para os indicadores sociais da avaliação hierárquica.

Alternativa	Simplicidade na manutenção e operação	Menor possibilidade de problemas ambientais	
		Odor desagradável	Proliferação de insetos e vermes
TSE	+++	++	+++
SAC	+++++	++	++
TSE + FAN	++++	++	++++
RAF	++++	++	++++
RAF + FAN	+++	++	++

NOTA: +++++ (mais favorável); + (menos favorável); +++++, +++, ++ (intermediários, em ordem decrescente).

FONTE: Von Sperling (2014).

## 4.2. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA

Em seguida, o método AHP foi aplicado para a análise hierárquica. Os resultados existentes a partir da aplicação do método permitiram a avaliação da predominância de cada alternativa (sistema de tratamento) no contexto geral, de forma numérica. O método AHP consiste na abordagem de cálculo algébrico, onde comparações são feitas em pares, e deve conter as seguintes propriedades (SAATY, 1977):

- a) **Reciprocidade:** a comparação do  $i$ -ésimo item com o  $j$ -ésimo item corresponde a um valor tal que na comparação inversa o valor se inverte – ou seja, para cada entrada  $m_{ij}$  existe uma entrada  $1/m_{ij}$ ;
- b) **Identidade:** quando o item é comparado com ele mesmo (na mesma  $i$ -ésima e  $j$ -ésima posição) a entrada  $m_{ij}$ , onde  $i = j$ , tem resultado 1 – ou seja, os elementos da diagonal principal da matriz são iguais a 1;
- c) **Consistência:** para a consistência da matriz de comparação a relação  $m_{ij} \times m_{jk} = m_{ik}$  é válida, o que implica que se o elemento A é mais importante que B, e B é mais importante que C, então o elemento A é mais importante que C.

### 4.2.1. Elaboração das Matrizes de Comparação em Pares e Cálculo dos Pesos

A aplicação do método AHP parte da construção de uma matriz  $M = (m_{ij})_{n \times n}$  (matriz de comparação em pares) onde cada item a ser avaliado pertence à uma linha e uma coluna (Equação 4), sendo  $n$  o número de itens avaliados (dimensão da matriz quadrada). Desta forma,

é possível avaliar os itens prioritários quando comparados em pares. Destaca-se que  $M_1, M_2, \dots, M_n$  correspondem aos itens que são comparados, e  $w_1, w_2, \dots, w_n$  correspondem aos seus julgamentos atribuídos.

Considerando que  $w_i, i = 1, \dots, n$  são os julgamentos atribuídos, percebe-se que cada entrada  $m_{ij}$  possui um valor correspondente  $w_i/w_j$ . Desta forma, para cada entrada  $m_{ij}$  a reciprocidade  $1/m_{ij}$  acontece (SAATY, 1977).

$$M = \begin{array}{c|ccccc} & M_1 & M_2 & M_3 & \dots & M_n \\ \hline M_1 & w_1/w_1 & w_1/w_2 & w_1/w_3 & \dots & w_1/w_n \\ M_2 & w_2/w_1 & w_2/w_2 & w_2/w_3 & \dots & w_2/w_n \\ M_3 & w_3/w_1 & w_3/w_2 & w_3/w_3 & \dots & w_3/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_n & w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_3 & \dots & w_n/w_n \end{array} \quad (4)$$

A comparação em pares é construída utilizando a escala atribuída por Saaty (1977). Atribuem-se valores aos itens em uma escala linear de 1 a 9, com base na sua intensidade de importância (Tabela 9), tendo sempre como resposta da pergunta “o quão importante é o  $i$ -ésimo item, em relação ao  $j$ -ésimo item?”.

Tabela 9 – Escala linear de comparações do método AHP.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância.	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
2	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes.	
3	Fraca importância de um sobre outro.	Experiência e julgamento favorecem levemente uma atividade sobre a outra.
4	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes.	
5	Forte ou essencial importância de um sobre o outro.	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra.
6	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes.	
7	Demonstrada importância de um sobre o outro.	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática.
8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes.	
9	Absoluta importância de um sobre o outro.	A evidência favorecendo uma atividade sobre a outra é da mais alta ordem de afirmação possível.

FONTE: Saaty (1977).

Destaca-se que se o  $i$ -ésimo item possuir um dos valores citados na escala, quando comparado ao  $j$ -ésimo item o valor deve ser recíproco. Por exemplo, se  $m_{ij} = 3$ ,  $m_{ji} = 1/3$ .

Nota-se ainda que, quando o item é comparado com ele mesmo, o resultado é uma intensidade de igual importância (de número 1) – atendendo à propriedade de matriz identidade (SAATY, 1977). Em outras palavras,  $w_n/w_n = 1$ , onde  $n = 1, 2, \dots, n$ .

Partindo das informações apresentadas, Saaty (1977) afirma que multiplicando a matriz  $M$ , pelo vetor transporte  $w^T = w_1, w_2, \dots, w_n$ , tem-se um vetor do tipo  $n \times w$  e a resolução do método AHP parte da Equação 5.

$$M \times W = n \times W \quad (5)$$

A matriz  $M$  é consistente se e somente se o autovalor máximo ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) seja igual à dimensão da matriz  $M$  (igual a  $n$ ) (SAATY, 1977) e os demais autovalores da matriz  $M$  próximos de zero. Sendo então os autovalores da matriz  $\lambda_i$ , onde  $i = 1, 2, \dots, n$ , próximos a zero, exceto por  $\lambda_{m\acute{a}x} = n$ , a solução do método parte da Equação 6.

$$M \times W = \lambda_{m\acute{a}x} \times w \quad (6)$$

A partir do contexto metodológico apresentado, a matriz de comparação em pares é estruturada dispondo os itens comparados na linha e coluna da matriz (estruturando uma matriz quadrada onde a dimensão é o número de itens comparados), conforme Equação 7, e os julgamentos são realizados, compondo as entradas  $m_{nn}$  da matriz.

$$M = \begin{array}{c|ccccc} & M_1 & M_2 & M_3 & \dots & M_n \\ \hline M_1 & m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1n} \\ M_2 & m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2n} \\ M_3 & m_{31} & m_{32} & m_{33} & \dots & m_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_n & m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \dots & m_{nn} \end{array} \quad (7)$$

Em seguida, é possível calcular o autovetor  $W$  de maneira aproximada, com os seguintes passos apresentados por Saaty (1977):

- a) Somar os julgamentos de cada coluna da matriz  $M$  (Equação 8);
- b) Dividir cada entrada pela soma de sua respectiva coluna (Equação 9); e
- c) Obter o autovetor  $W$  por meio da média aritmética de cada linha (Equação 10).

$$\mathbf{M} = \begin{array}{c|ccccc} & \mathbf{M}_1 & \mathbf{M}_2 & \mathbf{M}_3 & \dots & \mathbf{M}_n \\ \hline \mathbf{M}_1 & m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1n} \\ \mathbf{M}_2 & m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2n} \\ \mathbf{M}_3 & m_{31} & m_{32} & m_{33} & \dots & m_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{M}_n & m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \dots & m_{nn} \end{array} \quad (8)$$

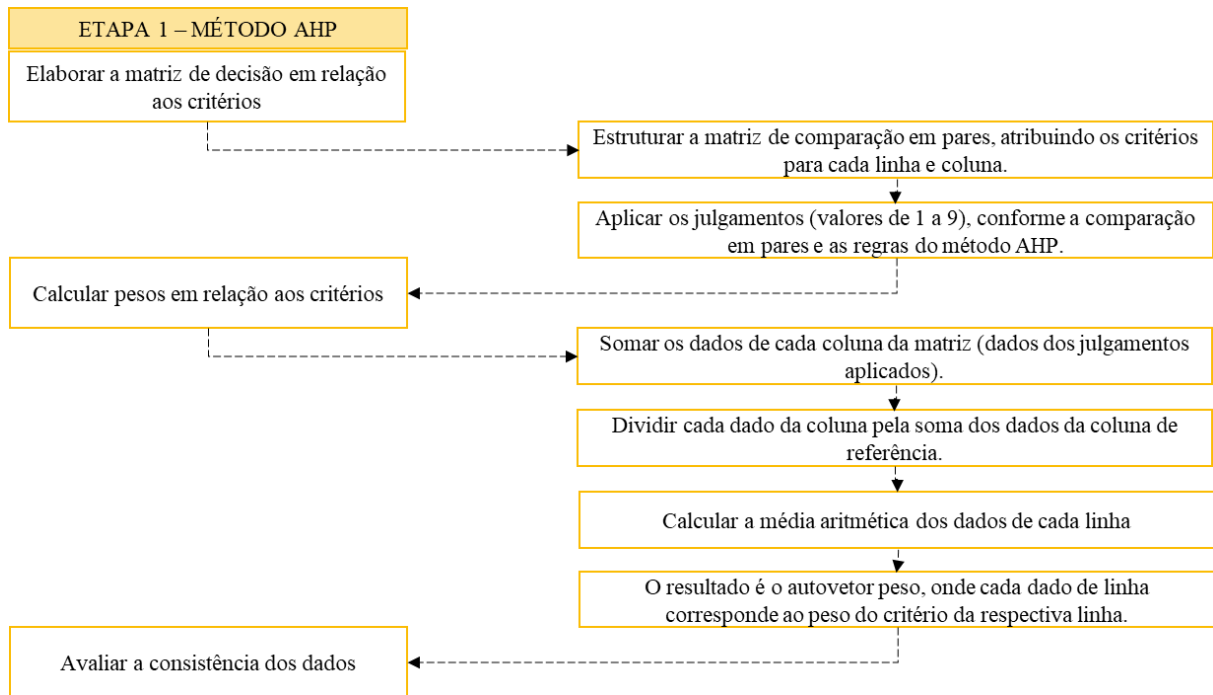
$$\sum = \sum_{i=1}^n m_{i1} \quad \sum_{i=1}^n m_{i2} \quad \sum_{i=1}^n m_{i3} \quad \dots \quad \sum_{i=1}^n m_{in}$$

$$\mathbf{M} = \begin{array}{c|ccccc} & \mathbf{M}_1 & \mathbf{M}_2 & \mathbf{M}_3 & \dots & \mathbf{M}_n \\ \hline \mathbf{M}_1 & \frac{m_{11}}{\sum_{i=1}^n m_{i1}} & \frac{m_{12}}{\sum_{i=1}^n m_{i2}} & \frac{m_{13}}{\sum_{i=1}^n m_{i3}} & \dots & \frac{m_{1n}}{\sum_{i=1}^n m_{in}} \\ \mathbf{M}_2 & \frac{m_{21}}{\sum_{i=1}^n m_{i1}} & \frac{m_{22}}{\sum_{i=1}^n m_{i2}} & \frac{m_{23}}{\sum_{i=1}^n m_{i3}} & \dots & \frac{m_{2n}}{\sum_{i=1}^n m_{in}} \\ \mathbf{M}_3 & \frac{m_{31}}{\sum_{i=1}^n m_{i1}} & \frac{m_{32}}{\sum_{i=1}^n m_{i2}} & \frac{m_{33}}{\sum_{i=1}^n m_{i3}} & \dots & \frac{m_{3n}}{\sum_{i=1}^n m_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{M}_n & \frac{m_{n1}}{\sum_{i=1}^n m_{i1}} & \frac{m_{n2}}{\sum_{i=1}^n m_{i2}} & \frac{m_{n3}}{\sum_{i=1}^n m_{i3}} & \dots & \frac{m_{nn}}{\sum_{i=1}^n m_{in}} \end{array} \quad (9)$$

$$\mathbf{W} = \begin{array}{c} \frac{m_{11}}{\sum_{i=1}^n m_{i1}} + \frac{m_{12}}{\sum_{i=1}^n m_{i2}} + \frac{m_{13}}{\sum_{i=1}^n m_{i3}} + \frac{m_{1n}}{\sum_{i=1}^n m_{in}} \\ \vdots \\ \frac{m_{n1}}{\sum_{i=1}^n m_{i1}} + \frac{m_{n2}}{\sum_{i=1}^n m_{i2}} + \frac{m_{n3}}{\sum_{i=1}^n m_{i3}} + \frac{m_{nn}}{\sum_{i=1}^n m_{in}} \end{array} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

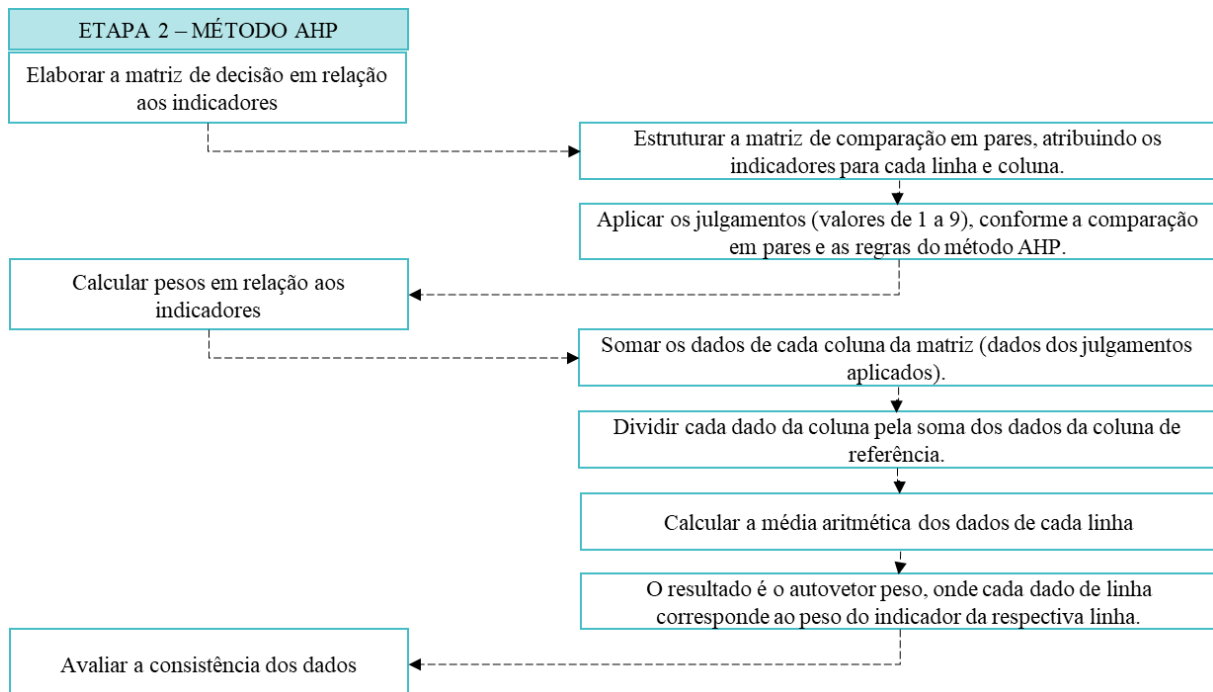
Para a análise hierárquica proposta nesta pesquisa, a matriz de comparação em pares deve ser realizada em três níveis (critérios, indicadores e alternativas). A seguir, a Figura 13 e Figura 14 representam os passos citados referente à estruturação da matriz de comparação em pares dos critérios e indicadores, respectivamente.

Figura 13 – Detalhamento da metodologia na Etapa 1 do Método AHP.



FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 14 – Detalhamento da metodologia na Etapa 2 do Método AHP.



FONTE: Autoria própria (2021).

Cada critério é comparado entre si (avaliação de nível 1, com uma matriz de comparação em pares para a comparação dos três critérios), representada pela matriz  $C$

(Equação 11). Sendo  $C_n$ , onde  $n = 1, 2, \dots, n$ , os critérios utilizados, e tendo como resultado o autovetor  $W_c$ , onde  $w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cn}$  são os pesos calculados para cada critério.

		<b><math>C_1</math></b>	<b><math>C_2</math></b>	<b><math>C_3</math></b>	<b><math>\dots</math></b>	<b><math>C_n</math></b>		
<b><math>C =</math></b>	$C_1$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$\dots$	$c_{1n}$	<b><math>W_c =</math></b>	$\begin{bmatrix} w_{c1} \\ w_{c2} \\ w_{c3} \\ \vdots \\ w_{cn} \end{bmatrix}$
	$C_2$	$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$	$\dots$	$c_{2n}$		
	$C_3$	$c_{31}$	$c_{32}$	$c_{33}$	$\dots$	$c_{3n}$		
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$		
	$C_n$	$c_{n1}$	$c_{n2}$	$c_{n3}$	$\dots$	$c_{nn}$		

Em seguida, cada indicador é comparado em pares com o grupo de indicadores de seu respectivo critério (avaliação de nível 2), representada pela matriz  $I$  (Equação 12). Sendo  $I_n$ , onde  $n = 1, 2, \dots, n$ , os indicadores utilizados, e tendo como resultado o autovetor  $W_i$ , onde  $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$  são os pesos de cada indicador. Sendo que a análise hierárquica proposta possui três critérios, na avaliação de nível 2 foram elaboradas três matrizes de comparação em pares, de forma a comparar os indicadores referentes ao grupo de indicadores de cada critério, separadamente.

		<b><math>I_1</math></b>	<b><math>I_2</math></b>	<b><math>I_3</math></b>	<b><math>\dots</math></b>	<b><math>I_n</math></b>		
<b><math>I =</math></b>	<b><i>Critérios</i></b>	<b><math>I_1</math></b>	<b><math>I_2</math></b>	<b><math>I_3</math></b>	<b><math>\dots</math></b>	<b><math>I_n</math></b>	<b><math>W_i =</math></b>	$\begin{bmatrix} w_{i1} \\ w_{i2} \\ w_{i3} \\ \vdots \\ w_{in} \end{bmatrix}$
	$I_1$	$i_{11}$	$i_{12}$	$i_{13}$	$\dots$	$i_{1n}$		
	$I_2$	$i_{21}$	$i_{22}$	$i_{23}$	$\dots$	$i_{2n}$		
	$I_3$	$i_{31}$	$i_{32}$	$i_{33}$	$\dots$	$i_{3n}$		
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$		
$I_n$	$i_{n1}$	$i_{n2}$	$i_{n3}$	$\dots$	$i_{nn}$			

Dando sequência na análise hierárquica, cada alternativa é comparada em relação à cada indicador (avaliação de nível 3), representada pela matriz  $A$  (Equação 13), sendo  $A_n$ , onde  $n = 1, 2, \dots, n$ , os indicadores utilizados, e tendo como resultado o autovetor  $W_a$ , onde  $w_{a1}, w_{a2}, \dots, w_{an}$  são os pesos de cada indicador.

		<b><math>A_1</math></b>	<b><math>A_2</math></b>	<b><math>A_3</math></b>	<b><math>\dots</math></b>	<b><math>A_n</math></b>		
<b><math>A =</math></b>	<b><i>Indicadores</i></b>	<b><math>A_1</math></b>	<b><math>A_2</math></b>	<b><math>A_3</math></b>	<b><math>\dots</math></b>	<b><math>A_n</math></b>	<b><math>W_a =</math></b>	$\begin{bmatrix} w_{a1} \\ w_{a2} \\ w_{a3} \\ \vdots \\ w_{an} \end{bmatrix}$
	$A_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$\dots$	$a_{1n}$		
	$A_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$\dots$	$a_{2n}$		
	$A_3$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	$\dots$	$a_{3n}$		
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$		
$A_n$	$a_{n1}$	$a_{n2}$	$a_{n3}$	$\dots$	$a_{nn}$			

Cada alternativa possui um dado referente aos indicadores utilizados no estudo, sendo estes os dados comparados na matriz. Por exemplo, se a alternativa (sistema de tratamento)  $A_1$  remove 80% de DBO e a alternativa  $A_2$  representa 60%, qual é a importância de  $A_1$  sobre  $A_2$  referente a este indicador. Neste contexto, outras 13 matrizes de comparação em pares foram estruturadas para a comparação dos dados de cada alternativa avaliada, em relação à cada indicador utilizado na análise hierárquica (uma matriz para cada indicador).

Ao avaliar as alternativas entre si (para cada indicador), tem-se um grande número de interações (comparações em pares) realizadas, sendo o tamanho da matriz de comparação em pares igual o número de alternativas avaliadas. Desta forma, Saaty (2008) apresentou uma forma alternativa para o estabelecimento dos pesos nesta etapa do método: o *rating mode* (modo de classificação) – um cálculo que apresenta resultados muito próximos do que a prioridade calculada por Saaty (1977), sendo uma boa alternativa quando o número de interações é alto (SAATY, 2008).

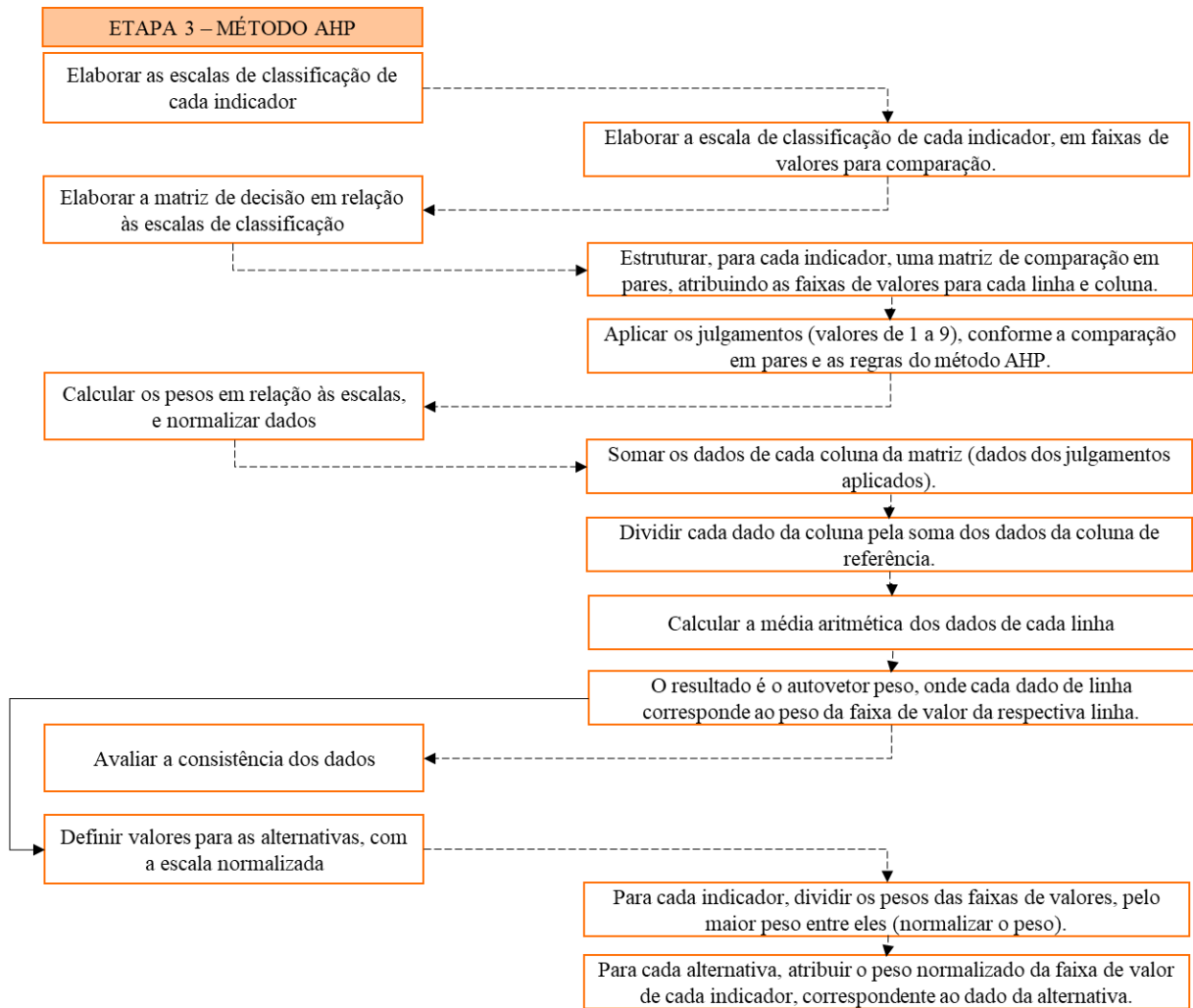
No modo de classificação, categorias são estabelecidas ao comparar um grande número de variáveis (SAATY, 2008). Por exemplo, ao comparar eficiência de remoção de DBO (onde os dados são números entre 0 e 100%) é criado um modo de classificação atribuindo os dados em faixas de valores de 0 a 20%, 21 a 30%, e assim por diante. Esta forma de cálculo reduz a quantidade de interações que são realizadas no método AHP, sendo que então cada matriz de comparação em pares de cada indicador será elaborada em cima das faixas de valores. Com os pesos calculados para as faixas de valores, estes são atribuídos às alternativas, conforme o dado de cada uma e à correspondência de que faixa de valor (SAATY, 2008). Esta adaptação no método está representada na Figura 15, e descrito na sequência.

De forma similar à Equação 13, os pesos são calculados para cada faixa de valores dos indicadores, e normalizados sendo dividido pelo maior entre eles, como exemplifica a Equação 14 (dados hipotéticos). Neste estudo, serão chamados de pesos normalizado, para facilitar o entendimento.

$$W_a = \begin{bmatrix} p_{categoria1} \\ p_{categoria2} \\ p_{categoria3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2354 \\ 0,3214 \\ 0,4432 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2354/0,4432 \\ 0,3214/0,4432 \\ 0,4432/0,4432 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5311 \\ 0,7252 \\ 1,0000 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Após o cálculo dos pesos normalizados, estes são atribuídos àquela alternativa em relação àquele indicador, em que o seu dado inicial corresponde a categoria do peso normalizado. Voltando ao exemplo inicial, se para a alternativa 01 a eficiência de remoção de DBO é 23,57%, o valor atribuído é o peso normalizado calculado para categoria 21 a 30%.

Figura 15 – Detalhamento da metodologia na Etapa 3 do Método AHP.



FONTE: Autoria própria (2021).

Assim, esta abordagem reduz a quantidade de interações na matriz de comparação em pares, onde as faixas de valores de cada indicador são comparadas entre si e, na sequência, os pesos normalizados são atribuídos às alternativas. Neste contexto, as escalas atribuídas para o cálculo dos pesos normalizados são apresentadas na Tabela 10.

Para cada indicador, foi elaborada uma matriz de comparação em pares comparando as faixas de valores descritas na Tabela 10, e os pesos normalizados foram atribuídos conforme apresentado anteriormente. A facilidade neste cálculo é o agrupamento de dados (que reduz o valor de  $n$ ), nota-se que foram elaboradas matrizes de ordem 4 e 5.

Tabela 10 – Escalas de normalização dos pesos atribuídos às alternativas, em relação à cada indicador.

Indicador	Escala				
ITE01	0 – 3,20	3,21 – 6,40	6,41 – 9,60	9,61 – 12,80	12,81 – 16,00
ITE02	100 – 350	351 – 700	701 – 1.050	1.051 – 1.400	1.400 – 1.750
ITE03					
ISO02	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto
ISO03					
IAM01					
IAM02					
IAM04	100,0 – 81,0	80,0 – 61,0	60,0 – 41,0	40,0 – 21,0	20,0 – 0,0
IAM05					
IAM06					
IAM07					
IAM03	4,0 – 3,1	3,0 – 2,1	2,0 – 1,1	1,0 – 0,0	
ISO01	Muito alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa

FONTE: Autoria própria (2021).

Por fim, a partir dos pesos calculados, a análise de consistência foi realizada e a prioridade parcial (em cada critério) e a prioridade geral foram calculadas.

#### 4.2.2. Análise da Consistência dos Pesos Obtidos nas Matrizes de Comparação em Pares

O método AHP precisa ser consistente nas matrizes de comparações em pares, ou seja, consistência nos julgamentos realizados – e a análise foi realizada como apresenta Saaty (1977).

Sendo o autovetor  $W$  a relação dos pesos de cada  $i$ -ésimo item avaliado pela matriz de comparação em pares, obtém-se o vetor  $X$  multiplicando a matriz  $M$  (matriz representada pela Equação 7) pelo autovetor  $W$  (Equação 15). Tal vetor é utilizado para o cálculo do autovalor máximo ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) da matriz de comparações.

$$X = M \times W = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2n} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & \dots & m_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

A matriz de comparações é uma matriz consistente desde que  $\lambda_{m\acute{a}x} = n$ , sendo  $n$  o número de linhas e colunas da matriz. O  $\lambda_{m\acute{a}x}$  da matriz de comparações em pares, é então obtido pela Equação 16.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{w_i} \quad (16)$$

Para avaliar se os julgamentos foram adequados, calcula-se o Índice de Consistência (IC), a partir da Equação 17. Quando próximo de zero, o IC apresenta que os julgamentos realizados são consistentes e úteis para o estudo realizado (SAATY, 1977).

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \sim 0,00 \quad (17)$$

Além do IC, é possível avaliar a consistência da matriz pela Razão de Consistência (RC), conforme Equação 18. Para o cálculo, utiliza-se o resultado obtido em IC e, os dados calculados para o Índice Randômico, conforme a ordem da matriz (TABELA 7). O teste de consistência pelo cálculo de RC deve resultar em 0,10 ou menos.

$$RC = \frac{IC}{IR} \leq 0,10 \quad (18)$$

Tabela 11 – Índice Randômico, de acordo com a ordem da matriz de comparações em pares.

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

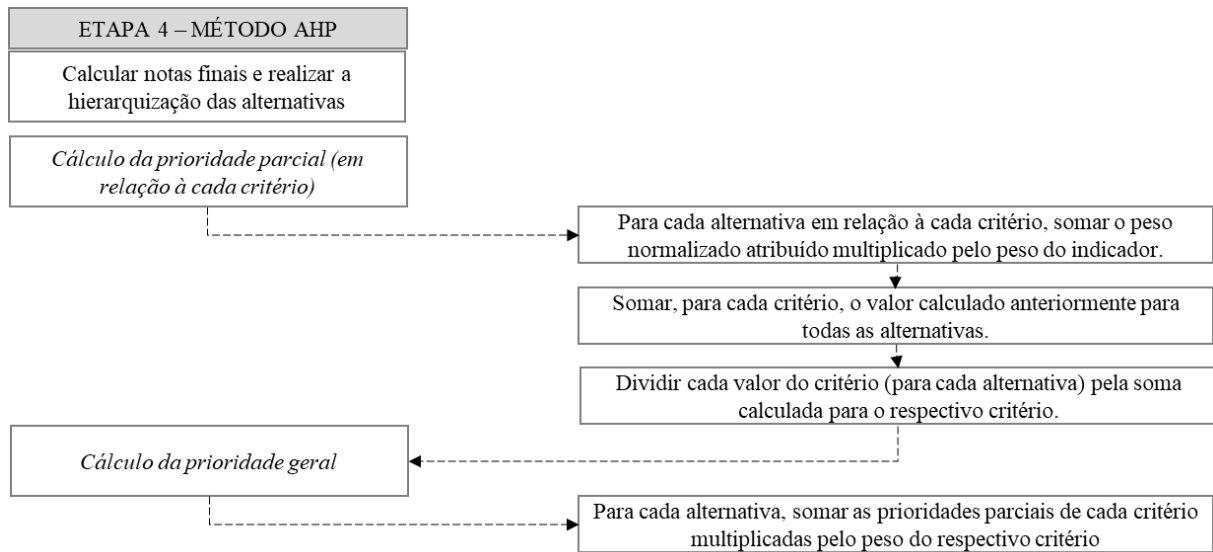
FONTE: Saaty (1987).

Caso a avaliação demonstre inconsistência nos dados resultantes, é necessário reavaliar os arranjos de julgamentos a fim de se atingir a consistência da matriz (SAATY, 1977).

#### 4.2.3. Cálculo das Prioridades Parciais e Globais

O cálculo da prioridade parcial (de cada critério) e prioridade global de cada alternativa que permita avaliar de forma hierárquica sistemas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais, é realizado por meio do produto matricial das componentes alternativas > indicadores > critérios. A Figura 16 representa as etapas de cálculo para as notas finais.

Figura 16 – Detalhamento da metodologia na Etapa 4 do Método AHP.



FONTE: Autoria própria (2021).

Conforme adotado para esta avaliação de viabilidade, foram utilizados três critérios de avaliação: (i) Critério Técnico-Econômico (*CTE*); (ii) Critério Ambiental (*CAM*); e (iii) Critério Social (*CSO*). Sendo  $x = 1, 2, \dots, X$  o número da alternativa,  $y = 1, 2, \dots, Y$  o número de indicadores técnico-econômicos,  $w = 1, 2, \dots, W$  o número de indicadores ambientais, e  $z = 1, 2, \dots, Z$  o número de indicadores sociais, a nota de cada critério, para cada alternativa, é calculado pelas Equações 19, 20 e 21.

$$CTE_x = \sum_{y=1}^Y P_{iy} \times ITE_{xy} \quad (19)$$

$$CAM_x = \sum_{w=1}^W P_{iw} \times IAM_{xw} \quad (20)$$

$$CSO_x = \sum_{z=1}^Z P_{iz} \times ISO_{xz} \quad (21)$$

Destaca-se que  $CTE_x$ ,  $CAM_x$  e  $CSO_x$  foram calculados com os pesos normalizados atribuídos e que, segundo Saaty (2008), devem ser convertidos em pesos referentes à prioridade novamente

Saaty (2008) realiza este cálculo após o cálculo da prioridade global. Contudo, neste estudo, além de analisar a hierarquia de forma geral (considerando os três critérios), deseja-se analisar a hierarquia separadamente em cada critério. Sendo assim, adaptou-se o método

apresentado por Saaty (2008), convertendo os pesos separadamente para cada critério dividindo cada prioridade parcial (nota de cada critério para cada alternativa) pela soma total do seu respectivo critério. Sendo  $x = 1, 2, \dots, X$  o número da alternativa, a prioridade parcial de cada alternativa em relação à cada critério ( $P_x$ ) é calculado pela Equação 22, 23, e 24 para CTE, CAM e CSO, respectivamente.

$$P_{CTEx} = \frac{CTE_x}{\sum_{x=1}^X CTE_x} \quad (22)$$

$$P_{CAMx} = \frac{CAM_x}{\sum_{x=1}^X CAM_x} \quad (23)$$

$$P_{CSOx} = \frac{CSO_x}{\sum_{x=1}^X CSO_x} \quad (24)$$

Assim,  $P_{CTEx}$  corresponde à prioridade parcial de cada alternativa em relação à CTE,  $P_{CAMx}$  corresponde à prioridade parcial de cada alternativa em relação à CAM, e  $P_{CSOx}$  corresponde à prioridade parcial de cada alternativa em relação à CSO. Destaca-se que a soma das prioridades parciais de todas as alternativas (para cada critério separadamente) é igual à 1 – sendo possível avaliar o percentual de participação de cada alternativa em cada critério, e identificar a alternativa de maior prioridade (maior percentual).

Por fim, a prioridade global de cada alternativa ( $PG_x$ ) é calculada pela soma da nota parcial de cada critério, multiplicando pelo seu respectivo peso, conforme a Equação 25.

$$PG_x = (P_{CTE} \times CTE_x) + (P_{CAM} \times CAM_x) + (P_{CSO} \times CSO_x) \quad (25)$$

Assim como foi para cada critério, a soma da prioridade global de todas as alternativas é igual à 1 – sendo possível avaliar o percentual de participação de cada alternativa em relação ao objetivo geral, e identificar a alternativa de maior prioridade (maior percentual).

#### 4.2.4. Análise de Sensibilidade do Método ao Objetivo Estabelecido por Elaboração de Diferentes Cenários

Para garantir que a análise de prioridades seja adequada, além da análise de consistência dos dados, foi realizada a análise de sensibilidade dos resultados obtidos. Nesta

etapa, cenários são elaborados alternando os pesos e dados utilizados para avaliar a sensibilidade dos resultados, ou seja, avaliar o quanto a prioridade parcial e a prioridade global são sensíveis a mudanças impostas nos cálculos. Definiu-se a elaboração de quatro cenários, além do primeiro cenário calculado (cenário base):

- a) **Cenário Base:** análise hierárquica com os valores médios de cada indicador para cada alternativa;
- b) **Cenário de Sensibilidade dos Dados:** análise hierárquica com os valores máximos e mínimos de cada indicador para cada alternativa, mantendo os pesos calculados para os critérios e indicadores do cenário base;
- c) **Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo (Aspectos Climáticos):** análise hierárquica com os valores médios de cada indicador para cada alternativa, considerando os dados dos sistemas de tratamento de esgoto existentes em municípios de clima Cfb e Cfa separadamente no cálculo do valor médio, mantendo os pesos calculados para os critérios e indicadores do cenário base;
- d) **Cenário de Sensibilidade dos Julgamentos e Pesos:** análise hierárquica com os valores médios de cada indicador para cada alternativa, alterando os pesos calculados para os critérios e indicadores do cenário base (mantendo a consistência da matriz).

Destaca-se que para nos cenários em que os dados são variados, estes referem-se aos dados quantitativos. Informações qualitativas das alternativas (ITE03, ISO01, ISO02 e ISO03) mantem-se as mesmas em todos os cenários realizados – exceto no Cenário de Sensibilidade de Dados 01. Neste, as informações qualitativas para estes indicadores foram alteradas para um grau a mais (nos valores máximos) e um grau a menos (nos valores mínimos) para avaliar a variação.

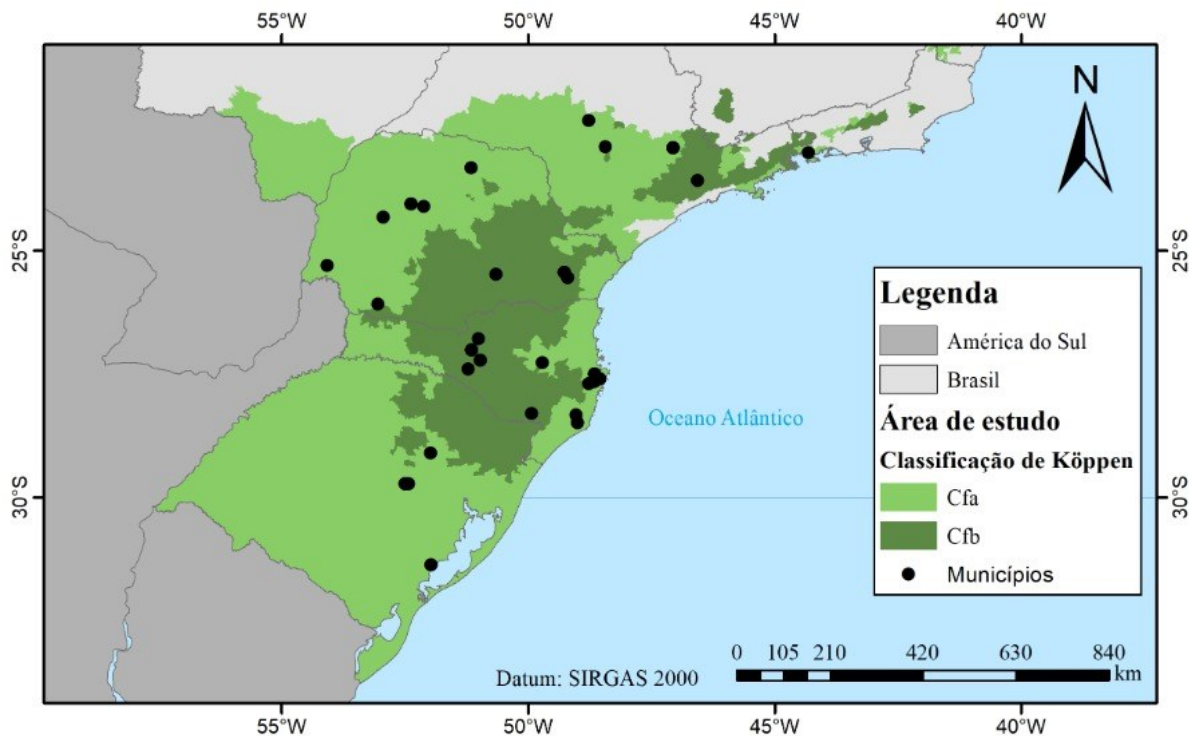
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela avaliação hierárquica das soluções de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais estão apresentados neste Capítulo. Estão apresentados a quantidade de sistemas (estudos de caso e projetos piloto) levantados na área delimitada, a sua separação conforme configuração e uma base teórica de cada tecnologia. Em seguida, os cenários de hierarquização com base no método de análise hierárquica foram descritos e uma síntese de comparação entre os cenários também é apresentada.

### 5.1. OS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO APLICÁVEIS EM ÁREAS RURAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Ao todo, 37 referências foram selecionadas com um total de 63 arranjos (Figura 17) de tratamentos de esgoto, sendo que algumas referências abordavam mais que um arranjo, que foram agrupados em 21 tipos de sistemas de tratamento de esgoto doméstico (Tabela 12).

Figura 17 – Municípios com arranjos de coletas e tratamento de esgoto doméstico de uso descentralizado em estudos publicados para a região delimitada.



NOTA: A descrição de cada estudo encontrado em cada município encontra-se no APÊNDICE A.

FONTE: Alvarez *et al.* (2013), elaborado pela Autora (2021).

Tabela 12 – Sistemas de tratamento de esgoto doméstico encontrados no levantamento de dados.

<b>Sigla</b>	<b>Sistema de Tratamento de Esgoto Doméstico</b>	<b>Clima Cfa</b>	<b>Clima Cfb</b>
FAN	Filtro anaeróbio	1	1
FAN + VER	Filtro anaeróbio + vermifiltro	1	-
RAC	Reator anaeróbio compartimentado	6	-
RAC + FAN	Reator anaeróbio compartimentado + filtro anaeróbio	1	-
RAC + SACv	Reator anaeróbio compartimentado + sistema alagado construído de fluxo vertical	3	-
RAF	Reator anaeróbio de fluxo ascendente	2	-
RAF + FAN	Reator anaeróbio de fluxo ascendente + filtro anaeróbio	3	1
RAF + FAN + SACH	Reator anaeróbio de fluxo ascendente + filtro anaeróbio + sistema alagado construído de fluxo horizontal	2	1
RAF + SACv	Reator anaeróbio de fluxo ascendente + sistema alagado construído de fluxo vertical	1	-
SACH	Sistema alagado construído de fluxo horizontal	2	-
SACv	Sistema alagado construído de fluxo vertical	3	1
TSE	Tanque séptico	-	2
TSE + FAN	Tanque séptico + filtro anaeróbio	4	-
TSE + FAN + FAR	Tanque séptico + filtro anaeróbio + filtro de areia	3	-
TSE + FAN + SACH	Tanque séptico + filtro anaeróbio + sistema alagado construído de fluxo horizontal	1	3
TSE + FAN + SACv	Tanque séptico + filtro anaeróbio + sistema alagado construído de fluxo vertical	1	-
TSE + FAN + SACv + SACH	Tanque séptico + filtro anaeróbio + sistema alagado construído híbrido (fluxo vertical + fluxo horizontal)	1	-
TSE + SACH	Tanque séptico + sistema alagado construído de fluxo horizontal	6	3
TSE + SACv	Tanque séptico + sistema alagado construído de fluxo vertical	6	1
TSE + SACv + SACH	Tanque séptico + sistema alagado construído híbrido (fluxo vertical + fluxo horizontal)	-	1
VER	Vermifiltro	3	-

NOTA: Para cada sistema de tratamento, adotou-se uma sigla de referência para facilitar e agilizar a discussão.

FONTE: Autoria própria (2021).

Nota-se a predominância de sistemas de tratamento em municípios de clima Cfa em relação aos sistemas de tratamento em municípios de clima Cfb. Não necessariamente tal constatação corresponde à realidade existente – o motivo pela predominância está relacionado à disponibilidade dos dados e a forma de apresentação dos mesmos no levantamento de estudos publicados referente ao assunto.

Conforme estudos de caso e projetos piloto foram sendo pesquisados, as informações de cada relatório/referência foram utilizadas para a complementação dos dados e informações necessários para a avaliação hierárquica dos sistemas. Principalmente, informações dos

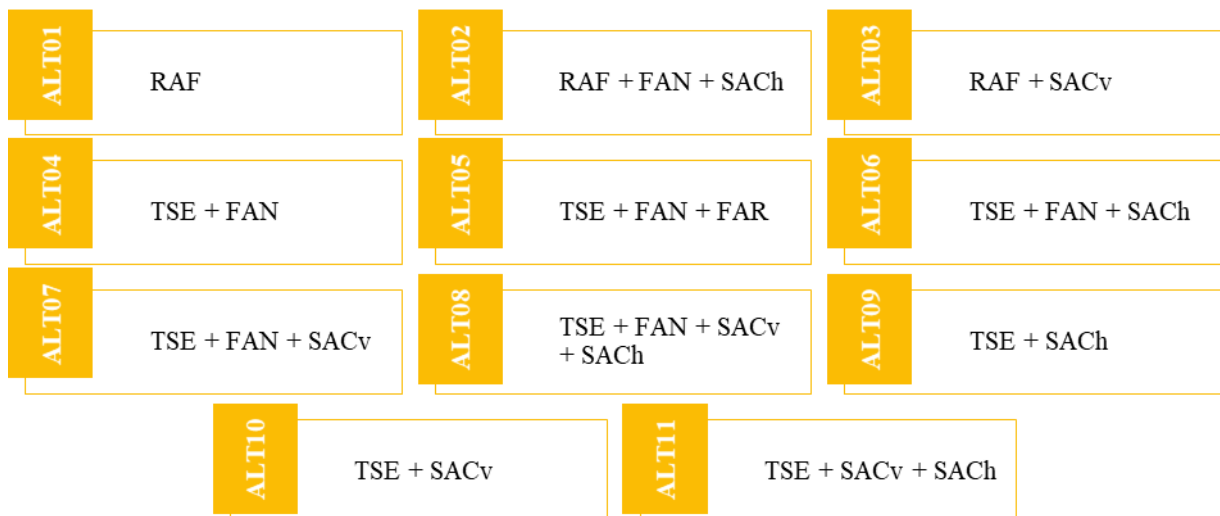
indicadores ambientais foram coletados por meio da busca de dados – visto que os relatórios/referências apresentavam, em sua maioria, dados a respeito da eficiência do sistema de tratamento na remoção de contaminantes existentes no esgoto doméstico e que cada estudo possui suas particularidades, que possibilitam variações na eficiência.

Assim, dos estudos encontrados na área de estudo (Figura 17), as informações relacionadas aos indicadores ambientais estão apresentadas detalhadamente (para cada estudo) no APÊNDICE A. Os dados foram trabalhados conforme item 4.1.2, e a Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 apresentam informações técnico-econômicas, ambientais e sociais, respectivamente, a respeito dos sistemas de tratamento de esgoto levantados.

Conforme Tabela 14 e Tabela 15, algumas informações ambientais não foram encontradas para os sistemas: FAN, FAN + VER, RAC, RAC + FAN, RAC + SACv e VER – sendo então desconsiderados na avaliação hierárquica). Além disso, os sistemas RAF + FAN e TSE possuem remoção de DBO abaixo de 60%, como é indicado pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (CONAMA, 2011), conforme os dados encontrados – sendo também desconsiderados na avaliação hierárquica. Ainda, o sistema SAC, tanto para fluxo horizontal quanto para fluxo vertical, são indicados para utilização apenas como pós-tratamento de esgoto doméstico (DOTRO *et al.*, 2017; TONETTI *et al.*, 2018; FUNASA, 2019b).

Neste contexto, a Figura 18 apresenta os 11 sistemas de tratamento de esgoto doméstico que foram avaliados conforme o método AHP para análise hierárquica – os princípios de tratamento e funcionamento de cada uma serão apresentados nos próximos itens.

Figura 18 – Sistemas de tratamento de esgoto doméstico avaliados pelo método AHP.



FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 13 – Indicadores técnico-econômicos dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico.

Soluções	ITE01	ITE02	ITE03
	Área necessária (m <sup>2</sup> /hab)	Custos (R\$/hab) <sup>1</sup>	Frequência de manutenção <sup>3</sup>
FAN	0,3 – 0,8 <sup>1</sup>	100,00 – 300,00	Muito baixo
FAN + VER	0,7 – 1,6 <sup>1</sup>	200,00– 600,00	Moderado
RAC	0,6 – 1,6 <sup>1</sup>	300,00 – 500,00	Muito baixo
RAC + FAN	0,9 – 2,4 <sup>1</sup>	400,00 – 800,00	Baixo
RAC + SACv	3,6 – 5,6 <sup>1,2</sup>	600,00 – 1.000,00	Moderado
RAF	0,3 – 0,8 <sup>1</sup>	300,00 – 500,00	Baixo
RAF + FAN	0,6 – 1,6 <sup>1</sup>	400,00 – 800,00	Moderado
RAF + FAN + SACH	5,6 – 11,6 <sup>1,2</sup>	700,00 – 1.300,00	Alto
RAF + SACv	3,3 – 4,8 <sup>1,2</sup>	600,00 – 1.000,00	Moderado
SACv	5,0 – 10,0 <sup>2</sup>	300,00 – 500,00	Baixo
SACH	3,0 – 4,0 <sup>2</sup>	300,00 – 500,00	Baixo
TSE	0,3 – 0,8 <sup>1</sup>	100,00 – 300,00	Muito baixo
TSE + FAN	0,6 – 1,6 <sup>1</sup>	200,00– 600,00	Baixo
TSE + FAN + FAR	1,0 – 2,6 <sup>1</sup>	300,00 – 900,00	Alto
TSE + FAN + SACH	5,6 – 11,6 <sup>1,2</sup>	500,00 – 1.100,00	Moderado
TSE + FAN + SACv	3,6 – 5,6 <sup>1,2</sup>	500,00 – 1.100,00	Moderado
TSE + FAN + SACv + SACH	8,6 – 15,6 <sup>1,2</sup>	700,00 – 1.300,00	Muito alto
TSE + SACH	5,3 – 10,8 <sup>1,2</sup>	400,00 – 800,00	Moderado
TSE + SACv	3,3 – 4,8 <sup>1,2</sup>	400,00 – 800,00	Moderado
TSE + SACv + SACH	8,3 – 14,8 <sup>1,2</sup>	700,00 – 1.300,00	Alto
VER	0,4 – 0,8 <sup>1</sup>	100,00 – 300,00	Moderado

FONTE: <sup>1</sup>Tonetti *et al.* (2018). <sup>2</sup>DOTRO *et al.* (2017); <sup>3</sup>Adaptado de Tonetti *et al.* (2018).

Tabela 14 – Indicadores ambientais dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico.

Soluções	IAM01	IAM02	IAM03	IAM04	IAM05	IAM06	IAM07
	Remoção de DBO (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de CT (unid. log)	Remoção de SST (%)	Remoção de N <sub>am</sub> (%)	Remoção de N <sub>total</sub> (%)	Remoção de P <sub>total</sub> (%)
FAN	79,00	88,33 ± 9,43	NC	88,41	NA	12,60	NC
FAN + VER	86,00	81,00	NC	NA	51,75	16,96	NC
RAC	37,00 ± 19,70	38,33 ± 24,49	NC	48,71 ± 36,59	13,73 ± 7,99	24,60	25,30 ± 7,50
RAC + FAN	NC	70,45	NC	93,34	NC	NC	NC
RAC + SAC <sub>v</sub>	91,00 ± 5,20	79,67 ± 11,72	NC	83,67 ± 10,02	60,33 ± 29,37	NC	70,67 ± 19,66
RAF	60,00 – 75,00	48,02 ± 5,35	1,00	80,72 ± 11,62	23,23 ± 2,51	32,52 ± 3,56	11,20 ± 8,91
RAF + FAN	52,26 ± 19,20	41,72 ± 18,18	1 a 2	87,33 ± 4,67	43,95 ± 32,82	34,69 ± 25,46	17,60 ± 6,62
RAF + FAN + SACH	83,05 ± 21,31	82,77 ± 15,71	2	97,40 – 99,30	0,00 – 75,00	0,00 – 84,00	79,59 ± 9,05
RAF + SAC <sub>v</sub>	92,00 – 97,50	61,40	2 a 4	94,80 – 98,60	92,12	98,39	99,60
SAC <sub>v</sub>	80,00 – 90,00	69,48 ± 19,46	2 a 4	85,96 ± 8,08	83,50 ± 14,90	44,58 ± 29,15	83,78 ± 16,59
SACH	79,20 ± 8,20	76,95 ± 6,01	2	68,15 ± 30,90	78,00 ± 23,05	0,00 – 60,00	76,90
TSE	26,05 ± 9,12	47,91 ± 3,88	0 a 1	55,24 ± 3,84	0,00 – 30,00	0,00 – 30,00	0,0 – 35,00
TSE + FAN	71,17 ± 9,17	71,37 ± 6,67	1,24 ± 0,41	86,78 ± 3,18	19,43 ± 5,31	36,23 ± 22,81	18,37 ± 1,23
TSE + FAN + FAR	95,42 ± 3,98	92,64 ± 5,55	2,17 ± 1,05	94,61 ± 0,86	61,44 ± 28,40	0,00 – 27,60	32,73 – 56,27
TSE + FAN + SACH	91,72 ± 4,33	92,43 ± 4,73	1,93 ± 1,06	97,40 – 99,30	47,73 ± 26,56	0,00 – 84,00	36,27 ± 6,12
TSE + FAN + SAC <sub>v</sub>	86,93 – 90,20	87,86 – 91,91	1,44	95,44 – 97,72	0,00 – 43,64	0,00 – 84,00	13,72 – 43,92
TSE + FAN + SAC <sub>v</sub> + SACH	94,19 – 95,64	91,53 – 94,35	1,88	84,56 – 92,28	23,79 – 58,08	0,00 – 93,60	18,52 – 47,04
TSE + SACH	89,54 ± 4,37	87,81 ± 5,92	1,92 ± 0,25	91,78 ± 6,18	50,70 ± 14,58	39,84 ± 17,69	35,27 ± 9,99
TSE + SAC <sub>v</sub>	86,98 ± 3,56	87,98 ± 3,35	2 a 4	93,60 ± 6,36	40,33 ± 10,79	40,67 ± 0,46	78,56 ± 4,26
TSE + SAC <sub>v</sub> + SACH	97,20 – 99,35	94,83 – 95,52	2 a 4	85,23 – 88,51	81,11 – 86,78	0,00 – 88,80	0,00 – 72,54
VER	77,33 ± 14,22	75,92 ± 14,76	NC	79,00 ± 26,46	52,81 ± 35,57	51,06 ± 56,49	NC

NOTA: O conjunto de referências agrupados em cada sistema de tratamento encontra-se no APÊNDICE A.

FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 15 – Indicadores sociais dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico.

Soluções	ISO01	ISO02	ISO03
	Simplicidade	Odor desagradável	Proliferação de insetos e vermes
FAN	NC	NC	NC
FAN + VER	NC	NC	NC
RAC	NC	NC	NC
RAC + FAN	NC	NC	NC
RAC + SACv	NC	NC	NC
RAF	Alta	Baixo	Muito baixo
RAF + FAN	Moderada	Moderado	Baixo
RAF + FAN + SACH	Baixa	Moderado	Alto
RAF + SACv	Moderada	Baixo	Moderado
SACv	Alta	Baixo	Muito baixo
SACH	Alta	Baixo	Muito baixo
TSE	Muito alta	Baixo	Baixo
TSE + FAN	Muito alta	Moderado	Baixo
TSE + FAN + FAR	Baixo	Moderado	Moderado
TSE + FAN + SACH	Moderada	Alta	Moderada
TSE + FAN + SACv	Moderada	Alto	Moderado
TSE + FAN + SACv + SACH	Muito baixa	Muito alto	Muito alto
TSE + SACH	Alta	Moderada	Baixa
TSE + SACv	Alta	Moderada	Baixa
TSE + SACv + SACH	Moderada	Alto	Alto
VER	NC	NC	NC

FONTE: Adaptado de Von Sperling (2014).

### 5.1.1. Sistemas de Tratamento de Digestão Anaeróbia (Tanque Séptico e Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente)

Como etapas de digestão anaeróbia, dentre os sistemas avaliados ou parte deles, estão os sistemas TSE e RAF. A base do tratamento biológico é o metabolismo bacteriano. No caso da digestão anaeróbia, o tratamento acontece onde bactérias realizam a estabilização (conversão) da matéria orgânica em gás carbônico, água, metano e material celular (reprodução dos microrganismos), na ausência de oxigênio (VON SPERLING, 2014). É um processo lento, com produção de odores provocados pelos gases gerados durante a digestão (FUNASA, 2019a).

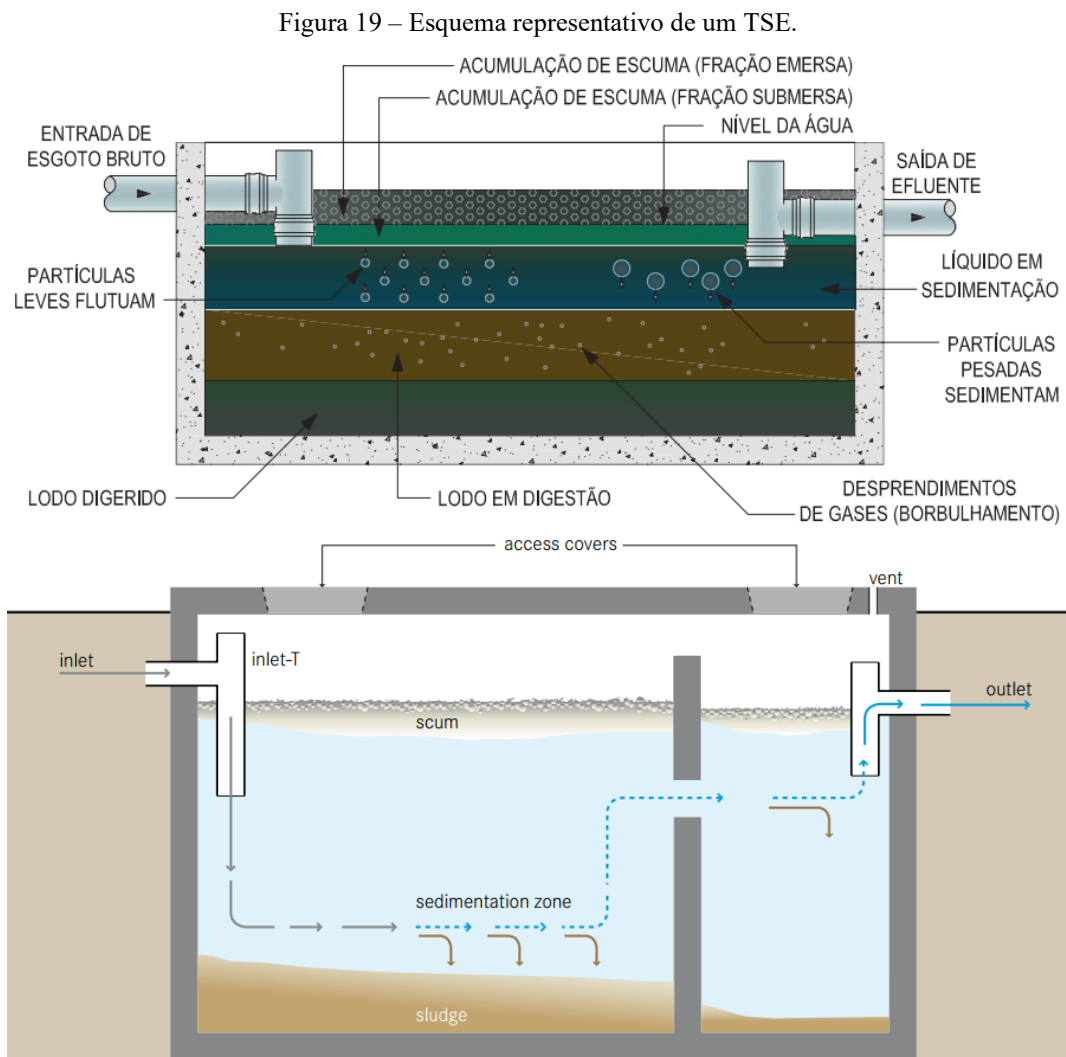
Von Sperling (2017) apresenta que, de forma simplificada, a conversão anaeróbia da matéria orgânica se dá em duas etapas:

- a) **Liquefação e formação de ácidos:** Bactérias acidogênicas convertem a matéria orgânica de formas complexas a moléculas mais simples e, em seguida, ácidos;
- b) **Formação de metano:** Em seguida, as bactérias metanogênicas convertem estas moléculas à metano, gás carbônico e água, principalmente.

Os TSEs são unidades simples e econômicas para tratamento de esgoto, onde há a sedimentação de sólidos, retenção de óleos e graxas, e digestão anaeróbia no interior de suas câmaras (que pode ser única, ou em série) (FUNASA, 2019a), e é considerado um tratamento moderado pela baixa eficiência de remoção de sólidos, matéria orgânica e organismos patogênicos (TILLEY *et al.*, 2014).

De forma geral, os TSEs apresentam as seguintes fases no processo de tratamento de esgoto doméstico: (i) retenção do esgoto para tratamento; (ii) sedimentação de sólidos em suspensão, formando o lodo; (iii) flotação de óleos, graxas e gorduras, entre outros materiais, formando a espuma na superfície do TSE; (iv) digestão do lodo e da espuma por bactérias anaeróbias, removendo organismos patogênicos; e (v) redução no volume de sólidos, pela digestão anaeróbia resultar em gases e líquidos (FUNASA, 2019a). Ao adentrar para o TSE, na parte superior, o esgoto doméstico é direcionado à parte inferior do TSE (ao fundo), onde há o acúmulo de sólidos e formação do lodo – enquanto óleos, gorduras e materiais flutuantes formam a espuma, no nível de esgoto do TSE. Durante o tempo em que o esgoto doméstico fica retido no TSE, parte dos sólidos e matéria orgânica são removidos pela digestão do lodo no fundo (concentração de sólidos, matéria orgânica que sedimentam, e presença de bactérias que fazem a digestão anaeróbia) e pela espuma na superfície (óleos e gorduras que flutam e separam-

se do esgoto tratado). Destaca-se que quanto maior o tempo de retenção do esgoto no TSE, e maior a sua temperatura, ocorre a predação e morte natural de organismos patogênicos (FUNASA, 2018) – eliminando-os do esgoto tratado. A Figura 19 apresenta um esquema representativo de um TSE de um e dois compartimentos.



NOTA: TSE de um compartimento (primeira imagem) e TSE de dois compartimentos (segunda imagem).

FONTE: Funasa (2019a) e Tilley *et al.* (2014).

Altvater (2008) desenvolveu um projeto piloto em Universidade (em escala de bancada) para a construção de um TSE seguido de uma etapa de tratamento chamada Unidade Tubular de Tratamento de Esgoto (UTTE). O TSE foi avaliado com três variações: relação comprimento/largura (C/L) de 6/1; relação C/L de 4/1; e com a adição de cortinas para fixação do meio aderido. Em média, as eficiências obtidas no projeto foram: 19,60% de remoção de DBO, 50,65% de remoção de DQO, e 57,95% de remoção de SST (ALTVATER, 2008).

Chaves *et al.*, (2019) também desenvolveram uma tecnologia de tratamento de esgoto doméstico descentralizado (possível de serem utilizados em áreas rurais e isoladas) com etapas de TSE (chamada de fossa digestora), decantador e SAC de fluxo ascendente plantado com *Canna x generalis* (Cana índica), *Coix lacryma-jobi* (Lágrimas de Nossa Senhora), *Dioscorea spp* (Inhame), e *Zingiber officinale* (Gengibre). Nesta configuração de sistema (em escala real, com esgoto doméstico de moradias estudantis), a etapa de TSE obteve, em média, 45,16% de remoção de DQO e 52,52% de remoção de SST (CHAVES *et al.*, 2019).

Como atividade principal de operação e manutenção de TSEs está a remoção de lodo (o crescimento do lodo aumenta ao passar dos tempos, e deve ser retirado parcialmente para não interferir no volume disponível na câmara para tratamento de esgoto). Durante a sua construção, o TSE pode deter de uma tampa de inspeção, para verificação das condições internas e inserção de bomba para succionar o lodo a ser retirado. O ideal é que esta limpeza seja realizada por caminhões apropriados (caminhões limpa-fossa), que transporte o material até o seu tratamento (FUNASA, 2019b). Em áreas rurais, é comum a prática de “encerrar” o uso de um TSE e a construção de um novo (FUNASA, 2019a), pela disponibilidade de área.

O uso desta técnica precisa ser avaliado com cautela pela baixa eficiência na remoção de matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos (TILLEY *et al.*, 2014) – o uso de pós-tratamento intensifica a eficiência do sistema (FUNASA, 2018). Ainda, pela necessidade de remoção do lodo, esta tecnologia é apropriada para locais onde há a possibilidade de seu transporte e tratamento (TILLEY *et al.*, 2014). Com base nos comentários e observações realizadas, a Tabela 16 apresenta um resumo de pontos positivos e negativos em relação ao tratamento de esgoto por TSE.

Tabela 16 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por TSE.

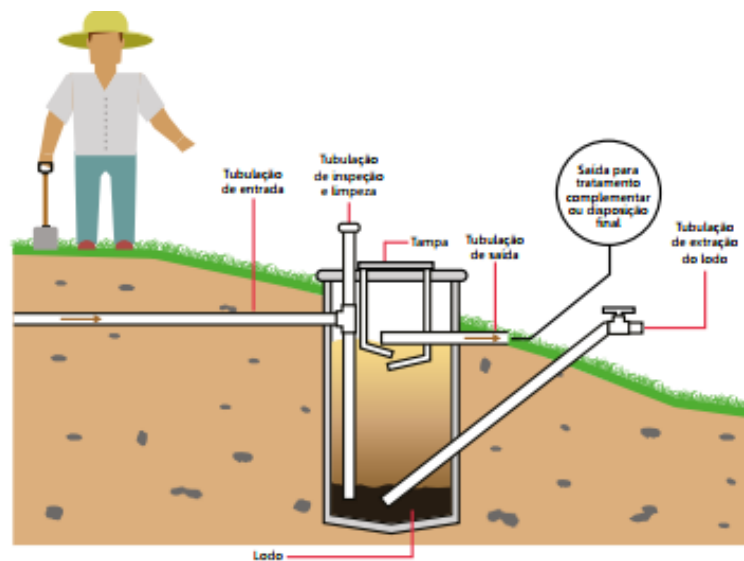
Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por TSE	
+ Tecnologia simples	- Baixa remoção de patógenos
+ Não é necessário o uso de eletricidade	- Baixa remoção de matéria orgânica
+ Baixo custo de operação	- Baixa remoção de nutrientes
+ Vida útil longa	- Baixa remoção de sólidos
+ Baixa quantidade de área necessária	- Odores
+ Pode ser construído debaixo da terra	- Remoção regular de lodo
	- Necessidade de pós-tratamento de esgoto tratado
	- Necessidade de pós-tratamento do lodo removido (ou disposição ideal)

FONTE: Autoria própria (2021), adaptado de Tilley *et al.* (2014).

Outro tratamento citado é por meio do uso de RAFs – formas compactas de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RAFA), também conhecidos como *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), tratamento muito utilizado como forma centralizada de tratamento de esgoto doméstico (em áreas urbanas).

De forma similar ao tratamento por TSE, o esgoto doméstico entra pelo reator e é direcionado para o fundo do seu interior, formando a chamada manta (leito) de lodo (acúmulo de sólidos, matéria orgânica e bactérias anaeróbias que realizam a digestão e degradação da matéria orgânica). Pelo princípio do tratamento ser a digestão anaeróbia, as fases ocorrem conforme em TSEs. Diferente do TSE, os RAFs têm placas defletoras na superfície da câmara de tratamento com o objetivo de separar o esgoto (já tratado quando está no nível da superfície), de materiais sólidos e gases formados durante o processo de tratamento (TONETTI *et al.*, 2018). A Figura 20 apresenta um esquema representativo de um RAF compacto.

Figura 20 – Esquema representativo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente.



FONTE: Tonetti *et al.* (2018).

Javarez Junior *et al.* (2007) avaliaram o sistema RAF + FAN e o sistema Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) + FAN, como sistemas em escala real tratando esgoto doméstico da Universidade. Suas eficiências foram calculadas em conjunto e para cada unidade separada. Em relação à etapa de RAF, a remoção de DQO foi em torno de 51,80% e a remoção de SST foi de 88,94% (JAVAREZ JUNIOR *et al.*, 2007).

Mello (2013) avaliou um sistema RAF + SACv utilizando a planta macrófita *Pontederia parviflora* (Aguapé), avaliando as diferentes eficiências com e sem a presença de

RAF na configuração do sistema (projeto piloto em pequena escala). Neste projeto, o RAF apresentou, em média, remoção de DQO de 44,24%, remoção de  $N_{am}$  de 21,45%, remoção de  $N_{total}$  de 35,04% e remoção de  $P_{total}$  de 4,90% (MELLO, 2013).

Para os demais indicadores ambientais, as referências utilizadas não abordavam análises e resultados. Então, utilizaram-se as eficiências típicas de Von Sperling (2014) para *UASB*, visto que o RAF é uma versão simplificada deste tipo de sistema.

Assim como nos TSEs, a atividade principal de operação e manutenção de RAFs é a remoção de lodo da câmara de tratamento (o crescimento do lodo aumenta ao passar dos tempos, e deve ser retirado parcialmente para não interferir no volume disponível de detenção de esgoto doméstico para tratamento). Durante a sua construção, pode ser inserida uma tubulação de extração de lodo, conforme exemplifica a Figura 20. Também é necessário o uso de caminhões limpa-fossa para o transporte o material até local adequado para o seu tratamento e o tratamento e disposição final adequada do lodo removido (TONETTI *et al.*, 2018).

Neste contexto, a Tabela 17 apresenta os pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por RAF. É um tratamento simplificado e de fácil operação – apesar da necessidade de limpeza periódica do lodo de fundo, e necessitar de realização do tratamento adequado, como no TSE. Por outro lado, o lodo de RAF já é um lodo estabilizado, que necessita apenas ser desaguado (desidratação e secagem de lodo) (TONETTI *et al.*, 2018) – facilitando seu processo de tratamento e disposição final.

Tabela 17 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por RAF.

Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por RAF	
+ Tecnologia simples	- Baixa remoção de patógenos
+ Não é necessário o uso de eletricidade	- Baixa remoção de matéria orgânica
+ Baixo custo de operação	- Baixa remoção de nutrientes
+ Vida útil longa	- Baixa remoção de sólidos
+ Baixa quantidade de área necessária	- Odores
+ Pode ser construído debaixo da terra	- Remoção regular de lodo
	- Necessidade de pós-tratamento de esgoto tratado
	- Necessidade de pós-tratamento do lodo removido (ou disposição ideal)

FONTE: Aatoria própria (2021), adaptado de Tilley *et al.* (2014).

### 5.1.2. Sistemas de Tratamento de Alagados Construídos

Os sistemas de tratamento de esgoto por alagados construídos também são conhecidos como zonas de raízes, *wetlands* (nomenclatura internacional, mais conhecida), entre outros (VON SPERLING, 2014). Os SACs são sistemas que otimizam processos que ocorrem naturalmente no meio ambiente, sendo por este motivo definida como uma forma de tratamento sustentável e de baixo impacto ambiental (DOTRO *et al.*, 2017). Consistem em lagoas – compartimentos impermeáveis escavados no solo (FUNASA, 2019a) – com plantas aquáticas, que normalmente possuem uma camada permeável (meio suporte de brita, cascalho ou areia, dependendo da configuração) e tubulações para direcionamento do fluxo para tratamento, possibilitando o tratamento de esgoto doméstico (VON SPERLING, 2014).

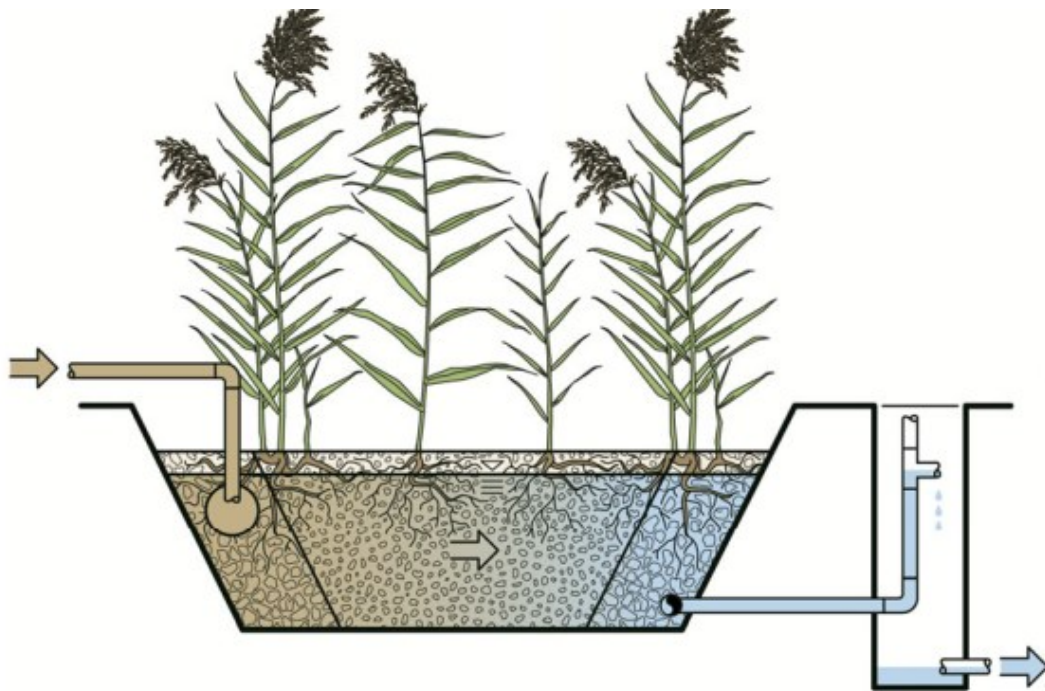
Neste sistema, o tratamento ocorre durante o contato do esgoto doméstico aos microrganismos aderidos no meio suporte, substrato, vazios e raízes e rizomas das plantas aquáticas – tratando o esgoto doméstico por meio de processos químicos, físicos e biológicos em um sistema solo-plantas-água. Nos processos biológicos, existem tanto tratamento por meio anaeróbio quanto por meio aerado (onde os vazios permitem a passagem de ar para a estabilização da matéria orgânica em condições aeradas, além das zonas aeróbias próximas às raízes e rizomas) (FUNASA, 2019a, VON SPERLING, 2014).

De forma estrutural, os SACs são divididos em SAC de fluxo superficial e subsuperficial. O escoamento superficial em SACs acontece quando as plantas aquáticas utilizadas no tratamento estão flutuantes e/ou enraizadas em uma camada de solo no fundo do sistema – com o esgoto doméstico em tratamento fluindo livre entre as folhas e caules das plantas (VON SPERLING, 2014). Por outro lado, o SAC de escoamento subsuperficial possui uma camada de meio suporte composta de brita, cascalho ou areia que dá suporte às plantas aquáticas e permite a passagem de esgoto doméstico. Neste sistema de escoamento, o esgoto doméstico se mantém abaixo da superfície da camada e entra em contato com as plantas aquáticas pelas suas raízes e rizomas (VON SPERLING, 2014). Funasa (2019a) destaca que o SAC de fluxo subsuperficial é mais vantajoso que o SAC de fluxo superficial, pelo menor potencial de proliferação de insetos e vermes, e menor potencial de geração de odores. Por outro lado, Von Sperling (2014) descreve que SACs de fluxo subsuperficial podem causar entupimentos em tubulações, caso o meio suporte não seja de granulometria suficiente para permitir o fluxo contínuo do esgoto doméstico.

Além da divisão entre SACs da direção do fluxo (subsuperficial ou superficial), os SACs também podem ser divididos pela direção do escoamento: horizontal ou vertical (VON SPERLING, 2014).

No SACH, o fluxo de esgoto doméstico a ser tratado no alagado flui horizontalmente pelo meio suporte (de cascalho, areia, entre outros materiais) – entra por uma borda do sistema e é coletado na borda oposta, para ser enviado para disposição final. Com o preenchimento dos vazios do meio suporte, há grandes processos anaeróbios existentes nesta configuração. O SACH deve ser isolado do solo, por meio de materiais plásticos e membrana geotêxtil (DOTRO *et al.*, 2017). Como demonstra a Figura 21, esquema representativo de um SACH, o esgoto tratado é coletado na saída do SAC em sua extremidade inferior, e há uma tubulação vertical externa ao alagado, onde é possível de realizar o controle do nível da superfície do esgoto doméstico em tratamento.

Figura 21 – Esquema representativo de um SACH.



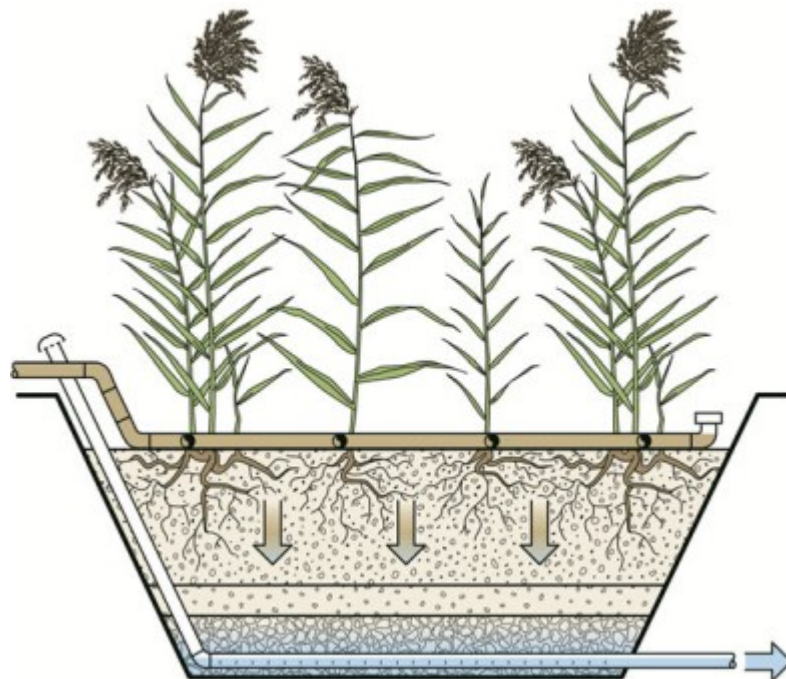
FONTE: Funasa (2019a) e Dotro *et al.* (2017).

Ceve (2014) avaliou o desempenho de um projeto piloto de SACH – utilizando como planta *Zantedeschia aethiopica* (Copo de leite) – com o uso de esgoto sintético (sem variação de carga). Nestas condições, o sistema obteve em média 72,70% de remoção de DQO, 94,30% de remoção de  $N_{am}$ , e 76,90% de remoção de  $P_{total}$  (CEVE, 2014).

Carvalho *et al.* (2015), elaborou um projeto piloto em ETE, onde foi utilizado como carga de esgoto doméstico a ser tratado o esgoto de saída do decantador primário (onde parte dos sólidos suspensos são removidos do esgoto por processo de sedimentação) e como planta emergente a *Thypha domingensis* (Taboa). Neste piloto, a remoção de DBO foi de 73,40%, a remoção de DQO foi de 81,20%, a remoção de SST foi de 46,30% e a remoção de  $N_{am}$  foi de 61,70% (CARVALHO *et al.*, 2015). Neste caso, considera-se que o esgoto doméstico recebeu um pré-tratamento ao ser enviado para o tratamento por meio do SACH com carga reduzida do que o esgoto bruto (sem tratamento).

Diferente do SACH, o SACv é operado de forma intermitente (durante um certo período de tempo), onde o esgoto doméstico é direcionado para a superfície do SACv, onde se infiltra através do meio suporte (da superfície ao fundo), como uma espécie de filtro (conforme apresenta a Figura 22). O esgoto doméstico adentra o SACv pela superfície, percola pelo meio filtrante (areia ou cascalho). No fundo, o esgoto tratado é coletado por tubulações e enviado para disposição final (DOTRO *et al.*, 2017; FUNASA, 2019a).

Figura 22 – Esquema representativo de um SACv.



FONTE: Adaptado de Dotro *et al.* (2017).

Como o fluxo é enviado para o SACv em cargas com um intervalo de tempo, entre uma carga de esgoto doméstico e outra o ar adentra os vazios (poros) do meio suporte (meio

filtrante) permitindo a ocorrência principalmente de processo aeróbio de degradação de matéria orgânica (DOTRO *et al.*, 2017; TILLEY *et al.*, 2014; VON SPERLING, 2014).

Em relação à eficiência do sistema, Mello (2013) avaliou um SACv utilizando a planta macrófita *Pontederia parviflora* (Aguapé) recebendo esgoto bruto para tratamento e esgoto pós-tratamento em um RAF (projeto piloto em pequena escala). Avaliando a eficiência do SACv, a eficiência de remoção de DQO foi de 46,12%, de  $N_{am}$  97,48%, de  $N_{total}$  88,30% e de  $P_{total}$  98,92% (MELLO, 2013).

Morais (2014) avaliou um SACv em camadas de brita, areia e brita de calcário, com planta macrófita *Z. aethiopica* (Copo-de-leite) e esgoto doméstico sintético para a avaliação do tratamento. Nesta configuração, o SACv teve eficiência de 80,0% de remoção de DQO, 93,50% de remoção de  $N_{am}$ , e 96,90% de remoção de  $P_{total}$  (MORAIS, 2014).

Marchesi (2020) avaliou um SACv em escala piloto, com meio suporte em pedra brita, planta macrófita *T. domingensis* (Taboa) e utilizando esgoto doméstico sintético para a avaliação do SACv em três cargas hidráulicas diferentes (50, 100 e 200 mm/dia). Em média, os experimentos realizados (com as variações de carga) demonstraram que o SACv possui eficiência de remoção de 90,0% de DQO, 77,93% de remoção de  $N_{am}$  e 66,10% de remoção de  $P_{total}$  (MARCHESI, 2020).

Nunes (2020) avaliou um SACv em escala piloto com quatro camadas de meio suporte: brita, areia, escória de fundição e granulado cerâmico. A espécie vegetativa utilizada foi *Spathiphyllum wallisii* (Lírio-da-paz), e o esgoto doméstico utilizado para a avaliação do SACv foi proveniente de uma ETE municipal – sendo coletado após o tratamento preliminar de gradeamento e desarenador. Os SACv avaliados foram projetados com um SACv com meio suporte em brita seguido (em paralelo), de três SACv com diferentes meio suportes: areia, granulado cerâmico, e escória de fundição. Nestas condições, a remoção média de DQO foi de 61,79%, a remoção média de SST foi de 73,85%, a remoção média de  $N_{am}$  foi de 65,08% e a remoção média de  $P_{total}$  foi de 73,21% (NUNES, 2020).

A utilização de um SAC (tanto SACH quanto SACv) não é aconselhável sem uma etapa anterior, pois existe a possibilidade de entupimento dos vazios (no meio suporte), maus odores, e proliferação de insetos e vetores (FUNASA, 2019a). Assim, o esgoto doméstico já deve ter parte de sua carga removida em etapa anterior (DOTRO *et al.*, 2017; FUNASA, 2019a) – sendo o SACH ou SACv utilizado como pós-tratamento (ou tratamento complementar) de algum sistema de tratamento de esgoto doméstico existente. Os SACs são utilizados, principalmente, como pós-tratamento de TSEs e RAFs (VON SPERLING, 2014).

Como apresentado, a situação mais crítica de manutenção e operação de um SAC é a possibilidade de entupimento dos vazios existentes no meio suporte (situação comum de acontecer em qualquer sistema de tratamento de esgoto doméstico com princípio de tecnologia baseada em filtros). Isto acontece por mal dimensionamento dos SACs ou elevadas cargas do sistema de pré-tratamento (tratamento da etapa anterior não é realizado corretamente, e o esgoto de saída carrega alta carga para ser tratado no SAC). Nestes casos, o monitoramento deve ser feito com frequência para avaliar necessidade de intervenções e reformas no meio suporte (DOTRO *et al.*, 2017). Em relação às plantas macrófitas, a poda, remoção de plantas em excesso, e o controle de ervas daninhas também deve ser realizado frequentemente (DOTRO *et al.*, 2017; VON SPERLING, 2014).

Por fim, a Tabela 18 e Tabela 19 apresentam os pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por SACH e SACv, respectivamente. Nota-se que a principal diferença é área ocupada para a sua implementação – SACH requer maior área para sua implementação (5,0 a 10,0 m<sup>2</sup> por pessoa) do que SACv (3,0 a 4,0 m<sup>2</sup> por pessoa) (DOTRO *et al.*, 2017).

Tabela 18 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por SACH.

<b>Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por SACH</b>	
+ Moderada remoção de matéria orgânica e sólidos	- Necessita de pré-tratamento (redução de carga)
+ Alta remoção de nutrientes	- Requer grandes áreas para implementação
+ Não é necessário o uso de eletricidade	- Risco de entupimento (preenchimento dos vazios)
+ Moderada remoção de patógenos	- Requer conhecimentos para construção e operação
+ Meio suporte pode ser de materiais de construção	- Manutenção mais complexa
+ Baixo custo de operação	- Longo tempo de inicialização para capacidade total

FONTE: Autoria própria (2021), adaptado por Tilley *et al.* (2014).

Tabela 19 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por SACv.

<b>Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por SACv</b>	
+ Moderada remoção de matéria orgânica e sólidos	- Necessita de pré-tratamento (redução de carga)
+ Alta remoção de nutrientes	- Risco de entupimento (preenchimento dos vazios)
+ Ocorrência de nitrificação (pela aeração do leito)	- Controle na dosagem do sistema (fluxo)
+ Área de implementação reduzida	- Requer conhecimentos para construção e operação
+ Não é necessário o uso de eletricidade	- Manutenção mais complexa e com maior frequência
+ Moderada remoção de patógenos	
+ Meio suporte pode ser de materiais de construção	
+ Baixo custo de operação	

FONTE: Autoria própria (2021), adaptado por Tilley *et al.* (2014).

### 5.1.3. Sistemas de Tratamento por Filtros Anaeróbios e Filtros de Areia

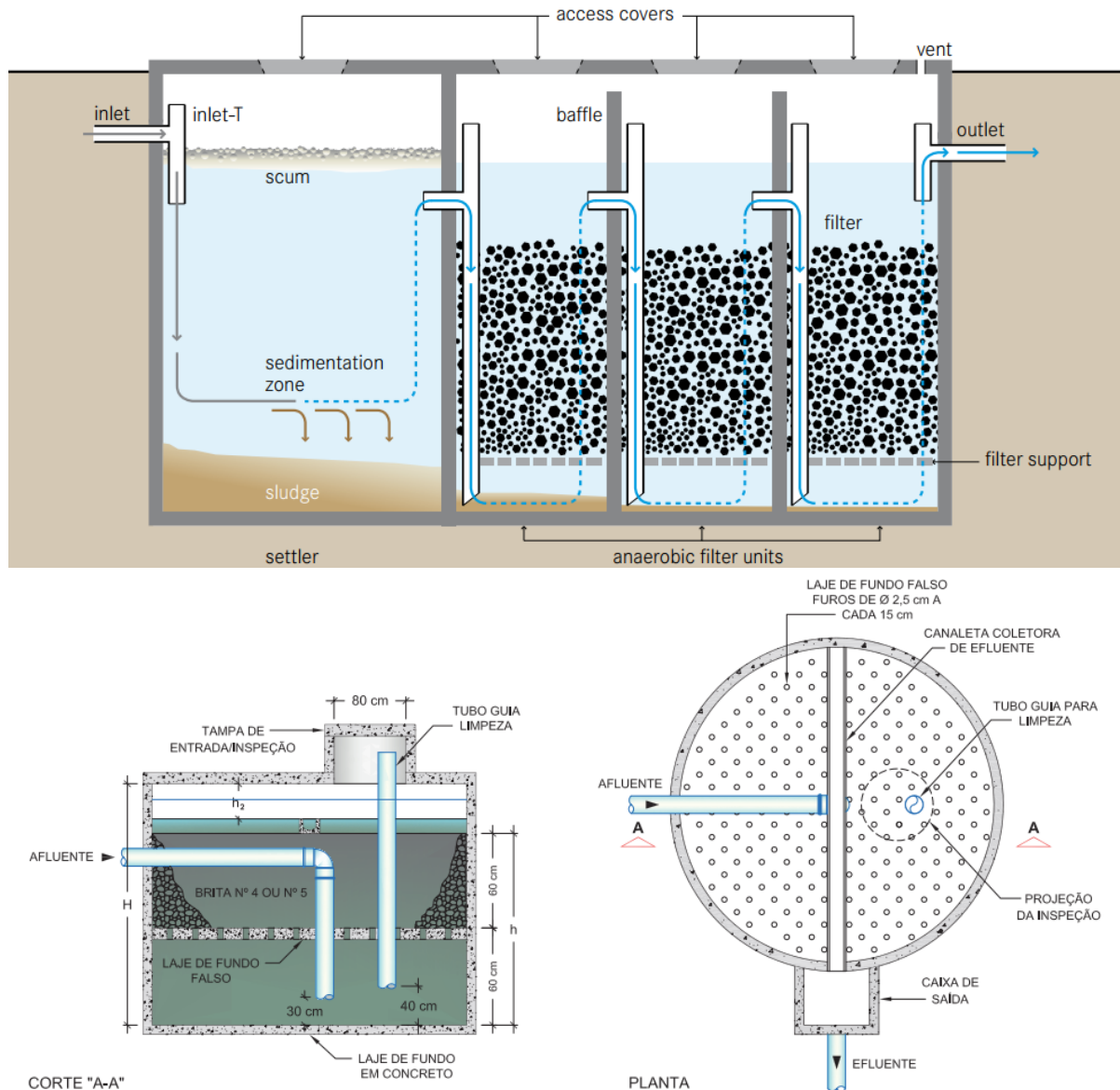
Por fim, outras duas formas de tratamento de esgoto doméstico estão presentes como uma etapa ou parte de uma configuração de tratamento de esgoto doméstico dos sistemas selecionados para avaliação: FANs e FARs.

Os FANs tratam-se de câmaras dividida em duas partes, sendo a inferior uma câmara vazia (fundo falso) e a superior uma câmara preenchida com meio suporte – brita, cascalho, pedaços de tijolo, peças de plástico, por exemplo (TILLEY *et al.*, 2014) – para a aderência de microrganismos anaeróbios que realizam a estabilização da matéria orgânica (FUNASA, 2018; FUNASA, 2019a). A estabilização da matéria orgânica neste funcionamento de filtro é de forma anaeróbia, visto que não há acesso de oxigênio para que o mesmo seja tratado por processo aerado. O FAN dispõe de fundo falso (câmara vazia de aproximadamente 0,60 metros) pois o esgoto doméstico é direcionado para o fundo e seu tratamento é realizado por meio de fluxo ascendente (do fundo à superfície) ao percolar pelo meio suporte de aderência dos microrganismos (aproximadamente 1,20 metros) (FUNASA, 2019a). A sua operação por meio de fluxo ascendente possibilita menores riscos da biomassa fixa (microrganismos anaeróbios) no meio suporte ser “lavada” da câmara de tratamento (TILLEY *et al.*, 2014). A Figura 23 apresenta um esquema representativo de FAN (a primeira imagem é de um FAN de pós-tratamento de TSE).

Paula *et al.* (2015) avaliaram FANs em escala piloto e esgoto sintético (com glicose como principal fonte de carbono) com diferentes meio suportes: carvão ativado, cerâmica de argila e borracha de pneu. Para acelerar a partida dos FANs, os filtros foram inoculados com lodo anaeróbio de reatores de ETE próxima. Os filtros apresentaram, em média, capacidade de remoção de 88,33% de DQO – sendo que o FAN de carvão ativado teve eficiência de 92%, o FAN de cerâmica de argila teve eficiência de 83% e o FAN de borracha de pneu teve 90% de eficiência na remoção de DQO (PAULA *et al.*, 2015).

Madrid (2016) avaliou em escala piloto a utilização de FAN preenchido com cascas de *Cocos nucifera* (Coco verde) e VERs para o tratamento de esgoto doméstico. Em seu experimento, o esgoto para tratamento foi coletado em um poço interligado à rede coletora do *campus* da Universidade. Nestas condições, o FAN avaliado apresentou eficiência média de remoção de 79,0% de DBO, 75,0% de DQO, 88,41% de SST e 12,60% de  $N_{total}$ . Destaca-se que a remoção de  $N_{am}$  foi de forma negativa (concentração de  $74,4 \pm 10,4$  mg/L no esgoto bruto e  $76,8 \pm 10,3$  mg/L no esgoto pós-FAN) (MADRID, 2016).

Figura 23 – Esquema representativo de um filtro anaeróbio.



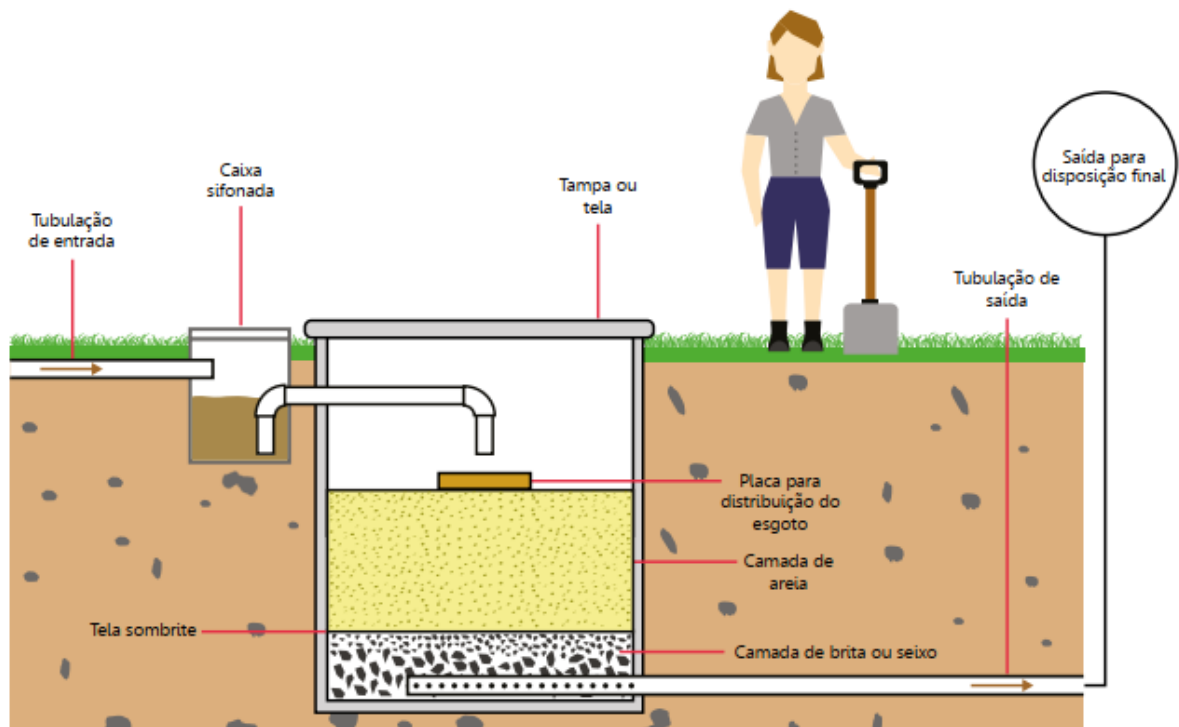
FONTE: Adaptado Tilley *et al.* (2014) e Funasa (2019a).

Em relação à sua operação e manutenção, o FAN requer de 6 a 9 meses para atingir sua capacidade total de eficiência, por ser necessário o estabelecimento e crescimento da biomassa aderida no meio suporte. Ao longo do tempo, o FAN corre risco de entupimento pela presença de sólidos que obstruem a passagem do esgoto doméstico em tratamento, e pelo crescimento bacteriano. Nestes casos, sua limpeza pode ser feita por retrolavagem (operar o fluxo de modo reverso) ou retirar o meio suporte para limpeza (TILLEY *et al.*, 2014), sendo necessário avaliar o destino do meio suporte retirado do FAN durante sua manutenção.

Outra forma de utilização de filtros para o tratamento de esgoto doméstico é pela utilização de FAR (também conhecido como vala de filtração). O FAR é composto por camadas

de material filtrante (areia, brita, seixo, entre outras) sendo a camada de areia a camada superior e de maior profundidade que as demais, seguida por materiais filtrantes de maior granulometria. Assim, o tratamento do esgoto doméstico ocorre durante a sua filtração de sólidos (processo físico) e degradação da matéria orgânica por microrganismos (processo biológico) presentes nas camadas filtrantes. O esgoto doméstico adentra o FAR pela superfície, percola pelas camadas, e é coletado na parte inferior do FAR por tubulações com pequenas aberturas para a drenagem do esgoto tratado (ABNT, 1997; TONETTI *et al.*, 2018). A Figura 24 apresenta um esquema representativo de um FAR.

Figura 24 – Esquema representativo de um filtro de areia.



FONTE: Adaptado de Tonetti *et al.* (2018).

Diferente do FAN, o FAR deve ser operado de maneira intermitente (com intervalos de aplicações) para permitir que oxigênio adentre os poros e vazios das camadas filtrantes e que processos aerados sejam realizados (ABNT, 1997; TONETTI *et al.*, 2018).

Em relação à sua manutenção, assim como o FAN o FAR tem risco de colmatção – entupimento dos vazios no meio filtrante, impossibilitando o tratamento adequado. Assim, quando necessário, a manutenção deste sistema é feita pela raspagem da areia de superfície da camada (a que recebe maior carga de esgoto doméstico no tratamento) e substituição por areia limpa e de características similares à anterior (ABNT, 1997; TONETTI *et al.*, 2018). Para

facilitar a manutenção e operação em sistemas de tratamento de esgoto doméstico que possuem FAR como uma de suas etapas, pode-se estruturar dois FARs em paralelo. Assim, enquanto um está em manutenção o outro está em operação (TONETTI *et al.*, 2018).

Dentre os estudos de caso e projetos piloto identificados na área de estudo, a etapa de FAR foi utilizada em configurações de sistemas compostos por TSE + FAN + FAR – sendo utilizado como pós-tratamento de esgoto doméstico (CRUZ, 2009; TONON *et al.*, 2015; GOMES, 2015).

Cruz (2009) avaliou um sistema em escala real para tratamento de esgoto doméstico com as etapas de TSE + FAN + FAR. O esgoto doméstico (coletado na Universidade) era encaminhado para caixas de armazenamento (as quais funcionavam como TSEs), e eram direcionados para dois FANs preenchidos com *C. nucifera* (Coco verde) e quatro FARs (FA1, FA2, FA3 e FA4) com uma camada de brita após o leito de areia. Em geral, e em relação ao esgoto doméstico tratado após os FANs, os FARs obtiveram médias de eficiência de 79,53% de remoção de DQO ( $66,4 \pm 14,3\%$  no FA1,  $81,1 \pm 12,3\%$  no FA2,  $86,1 \pm 6,8\%$  no FA3 e  $84,5 \pm 10,8\%$  no FA4), 84,48% de remoção de DBO ( $82,0 \pm 5,1\%$  no FA1,  $91,7 \pm 4,0\%$  no FA2,  $89,2 \pm 3,6\%$  no FA3, e  $87,0 \pm 9,1\%$  no FA4), e 63,63% de remoção de SST ( $65,0 \pm 16,6\%$  no FA1,  $68,3 \pm 14,7\%$  no FA2,  $65,7 \pm 10,9\%$  no FA3, e  $55,5 \pm 16,3\%$  no FA4) (CRUZ, 2009).

Com configuração similar, Tonon *et al.* (2015) direcionou o esgoto pós-tratamento em TSE (caixas de armazenamento) para cinco FANs – três destes preenchidos com anéis de *Bambusa tuldoides* (Bambu) e os demais preenchidos com cascas de *C. nucifera* (Coco verde) – e, em seguida, o esgoto doméstico foi direcionado para tratamento em quatro FARs – os quais foram avaliados em 10 diferentes taxas hidráulicas. Em média, os FARs apresentaram eficiência de remoção de 92,67% para DBO, 85,89% para DQO, 70,69% para SST, 76,15% para  $N_{am}$ , e 32,73% para  $P_{total}$  (TONON *et al.*, 2015).

Gomes (2015) avaliou um sistema composto por TSE + FAN + FAR para atender residências em uma região de Campinas (SP) – com FAN também preenchido com cascas de *C. nucifera* (Coco verde), e o FAR com camadas de brita e entulho (pedaços de tijolo) após o leito de areia do filtro. Nestas condições, a etapa de FAR apresentou eficiência de remoção de 63,0% para SST, 60,0% para DQO, 54,0% para DBO, 32,35% para  $N_{am}$  (GOMES, 2015).

De forma geral, a preocupação de um sistema de tratamento de esgoto doméstico em tecnologias baseadas em filtro é o risco de entupimento do meio suporte, pelo preenchimento do mesmo com excesso de lodo gerado nos processos de tratamento e retenção de sólidos. De acordo com Tonetti *et al.* (2018), FANs e FARs são etapas de tratamento válidas apenas para

receber esgoto pré-tratado (esgoto doméstico tratado por outra tecnologia, anteriormente ao seu tratamento por meio de FAN e/ou FAR).

No caso de excesso de lodo gerado no processo de tratamento, a limpeza do lodo pode ser realizada por caminhão limpa-fossa ou lavagem parcial dos filtros (FUNASA, 2019a) – para FANs, a lavagem completa atrasa o reinício sistema pela lavagem completa dos microrganismos aderidos no meio suporte. Destaca-se que parte do lodo retirado do meio suporte durante o processo de limpeza do FAN, deve ser descartado adequadamente (enviado para tratamento e disposição final) (FUNASA, 2019a).

No caso de FARs, a areia colmatada deve ser descartada. O reuso deste material pode ser avaliado após a sua secagem, conforme suas condições e características (GOMES, 2015). Do contrário, deve ser disposta de forma adequada.

Considerando as informações apresentadas, a Tabela 20 e Tabela 21 apresentam os pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto doméstico por FAN e FAR, respectivamente.

Tabela 20 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por FAN.

<b>Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por FAN</b>	
+ Não é necessário o uso de eletricidade	- Requer conhecimentos para construção e operação
+ Baixo custo de operação	- Baixa remoção de patógenos e nutrientes
+ Longa vida útil	- Riscos de entupimento
+ Alta remoção de matéria orgânica e sólidos	- Lodo gerado deve ser destinado adequadamente
+ Moderada quantidade de área necessária	- Manutenção mais complexa
+ Pode ser construído de forma subterrânea	
+ Baixa produção de lodo	

FONTE: Autoria própria (2021), adaptado de Tilley *et al.* (2014).

Tabela 21 – Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por FAR.

<b>Pontos positivos e negativos de tratamento de esgoto por FAR</b>	
+ Moderada quantidade de área necessária	- Requer conhecimentos para construção e operação
+ Pode ser construído de forma subterrânea	- Riscos de entupimento
+ Moderada remoção de matéria orgânica e sólidos	- Manutenção mais complexa
+ Pode ser construído reaproveitando materiais de construção civil	- O uso de eletricidade é necessário se utilizado bombas para operação em fluxo intermitente.
+ Moderada remoção de patógenos	- Avaliar destinação da área removida na manutenção

FONTE: Autoria própria (2021).

## 5.2. A ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS MULTICRITÉRIOS DAS SOLUÇÕES APLICÁVEIS

Iniciou-se o processo de hierarquização pelo cálculo dos pesos de cada critério. De acordo com Von Sperling (2014), os custos do projeto se tornam um dos itens mais críticos na escolha de sistemas de tratamento de esgoto doméstico. Sendo assim, o CTE foi julgado como prioritário entre os três critérios envolvidos na análise. Ainda, considerando a eficiência na remoção de contaminantes de esgoto doméstico essencial para a implantação do sistema (e sua consequente melhoria na qualidade de vida), o CAM foi o segundo critério prioritário na análise. Desta forma, a Tabela 22 apresenta os julgamentos realizados, os pesos calculados, e a análise da consistência da matriz de comparação em pares dos critérios.

Tabela 22 – Matriz de comparação em pares dos critérios e seus respectivos pesos calculados.

<b>Crítérios</b>	<b>Técnico-Econômico</b>	<b>Social</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Peso de cada critério</b>
<b>Técnico-Econômico</b>	1	7	3	0,64
<b>Social</b>	1/7	1	1/5	0,07
<b>Ambiental</b>	1/3	5	1	0,28
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )				3,07
IC ( $IC \sim 0,00$ )				0,03
RC ( $RC \leq 0,10$ )				0,06

FONTE: Autoria própria (2021).

Em seguida, o peso de cada indicador (em comparação com os indicadores do mesmo critério) foram calculados. Em relação aos indicadores técnico-econômicos (ITEs), as informações das áreas necessárias, custo de implementação e frequência de manutenção foram comparados entre si e o peso de cada indicador está apresentado na Tabela 23.

Para prevalecer o indicador custo, este recebeu uma maior importância ao ser comparado com os demais ITEs, sendo que também foi considerado importante a frequência da manutenção – considerando que quanto mais fácil a manutenção e mais barato o sistema de tratamento, melhor será a utilização para os usuários.

Tabela 23 – Matriz de comparação em pares dos indicadores técnico-econômicos e seus pesos calculados.

ITE	Área necessária	Custo de implantação	Frequência de manutenção	Peso de cada indicador
Área necessária	1	1/7	1/5	0,07
Custo de implantação	7	1	3	0,64
Frequência de manutenção	5	1/3	1	0,28
Autovalor ( $\lambda_{máx} \sim n$ )				3,07
IC ( $IC \sim 0,00$ )				0,03
RC ( $RC \leq 0,10$ )				0,06

FONTE: Autoria própria (2021).

Para os indicadores sociais (ISO), as características de cada sistema foram comparadas entre si, referentes aos indicadores adotados: simplicidade, odor desagradável e proliferação de insetos e vermes. Na comparação destes indicadores, a simplicidade do sistema prevaleceu aos demais ISOs – visto que quando mais simples é o sistema, melhor será aos usuários (mantendo coerência com o julgamento de fácil manutenção citado anteriormente). Para os demais ISOs, julgou-se o odor desagradável mais importante que a proliferação de insetos e vermes. Assim, os julgamentos foram atribuídos e os pesos calculados (Tabela 24).

Tabela 24 – Matriz de comparação em pares dos indicadores sociais e seus pesos calculados.

ISO	Simplicidade	Odor desagradável	Proliferação de insetos e vermes	Peso de cada indicador
Simplicidade	1	3	5	0,65
Odor desagradável	1/3	1	2	0,23
Proliferação de insetos e vermes	1/5	1/2	1	0,12
Autovalor ( $\lambda_{máx} \sim n$ )				3,00
IC ( $IC \sim 0,00$ )				0,00
RC ( $RC \leq 0,10$ )				0,00

FONTE: Autoria própria (2021).

Por fim, os pesos para cada indicador ambiental (IAM) foram calculados. Definiu-se como essencial importância a remoção de matéria orgânica (DBO e DQO) em relação à remoção de nutrientes ( $N_{am}$ ,  $N_{total}$  e  $P_{total}$ ), seguindo as colocações de Molonis-Selante *et al.* (2014). Além disso, informações referentes à remoção de matéria orgânica estavam mais

evidentes nas referências utilizadas do que a remoção de nutrientes (sendo então priorizado os indicadores de remoção de DBO e DQO pela base de dados deste estudo). A remoção de CT também foi considerada um indicador importante quando comparado à remoção de nutrientes, e tão importante quanto à remoção de matéria orgânica. Este julgamento foi atribuído visto a grande relação entre saneamento e saúde, pela transmissão de doenças a partir da contaminação de cursos d'água por esgoto doméstico.

Em relação aos indicadores de remoção de nutrientes, estabeleceu-se que a remoção de  $N_{am}$  é mais importante que a remoção de  $N_{total}$  e  $P_{total}$  – e estas últimas possuem o mesmo grau de importância entre si. Por fim, definiu-se a remoção de SST como menos importante que os demais indicadores, pois percebeu-se pelos dados de remoção de SST de cada alternativa que a variação entre elas é pequena – o que não interfere tanto na avaliação hierárquica pelos dados estarem próximos e não representarem uma hierarquia entre as faixas de remoção propostas (conforme apresentado a seguir na Tabela 29).

Assim, a Tabela 25 apresenta os julgamentos atribuídos na comparação em pares dos IAMs, os pesos calculados para cada indicador e os dados de consistência da matriz.

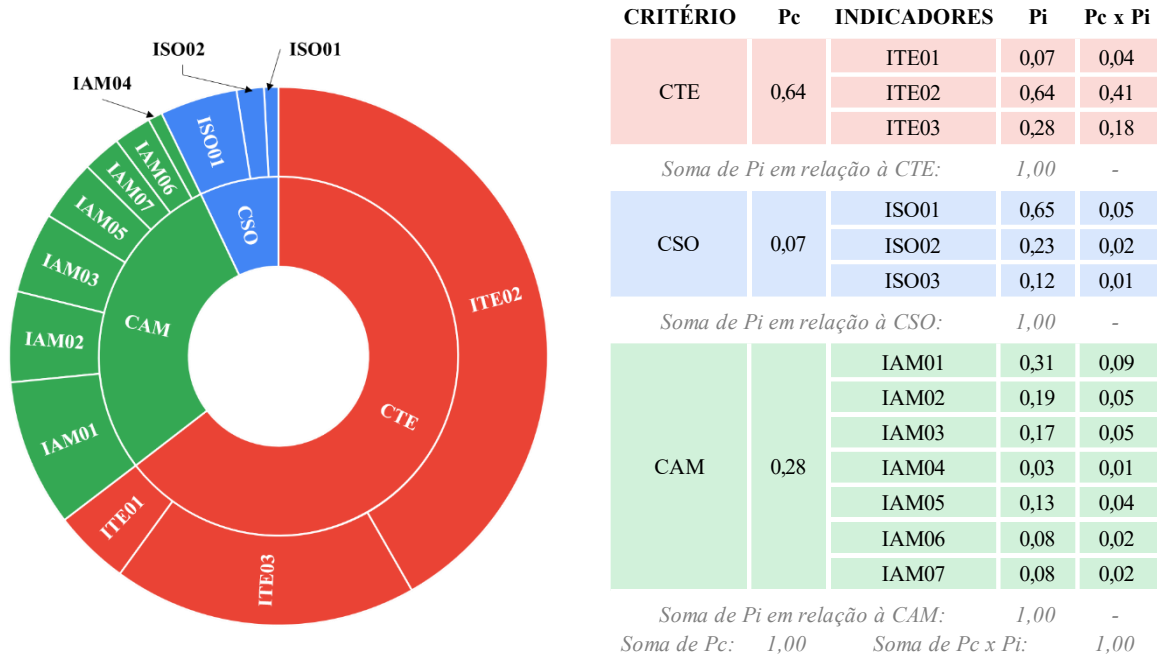
Tabela 25 – Matriz de comparação em pares dos indicadores ambientais e seus pesos calculados.

IAM	Remoção de DBO	Remoção de DQO	Remoção de CT	Remoção de SST	Remoção de $N_{am}$	Remoção de $N_{total}$	Remoção de $P_{total}$	Peso de cada indicador
Remoção de DBO	1	2	2	7	5	3	3	0,31
Remoção de DQO	1/2	1	1	5	4	2	2	0,19
Remoção de CT	1/2	1	1	5	2	2	2	0,17
Remoção de SST	1/7	1/5	1/5	1	1/5	1/3	1/3	0,03
Remoção de $N_{am}$	1/5	1/4	1/2	5	1	3	3	0,13
Remoção de $N_{total}$	1/3	1/2	1/2	3	1/3	1	1	0,08
Remoção de $P_{total}$	1/3	1/2	1/2	3	1/3	1	1	0,08
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )								7,46
IC ( $IC \sim 0,00$ )								0,08
RC ( $RC \leq 0,10$ )								0,06

FONTE: Autoria própria (2021).

Para facilitar a compreensão dos pesos dos critérios e indicadores, a Figura 25 representa a composição dos mesmos – a soma dos pesos (tanto no nível de critério quanto no nível de indicadores em relação a um critério) tem como resultado o valor 1, equivalente ao total de 100% do nível analisado (do nível em que os pesos foram calculados).

Figura 25 – Esquema representativo da relação entre os pesos dos critérios e indicadores.



FONTE: Autoria própria (2021).

Ouyang *et al.* (2018) avaliaram em cinco diferentes cenários quatro critérios: ambiental, econômico, ecológico e de gestão, e técnico. No cenário 1, todos os critérios receberam mesmo peso (0,25). Nos cenários seguintes, cada critério foi avaliado, um por vez, com peso 0,8 enquanto os demais foram avaliados com peso 0,067 (OUYANG *et al.*, 2018).

Molinos-Selante *et al.* (2014) definiu o critério ambiental como prioritário, com peso 0,471 – seguido do critério econômico com peso 0,308 e critério social com peso 0,221. Esta variação de peso corresponde ao julgamento de prioridade atribuído entre os critérios, conforme opiniões de especialistas avaliadas pelos autores (MOLINOS-SELANTE *et al.*, 2014).

Em seguida, os pesos referentes à cada escala de indicadores – para atribuir o valor a cada alternativa – foram calculados. Com base na escala apresentada para cada indicador no Capítulo de Materiais e Métodos (na Tabela 10), as matrizes a seguir apresentam os pesos e pesos normalizados calculados para cada faixa de valor da escala: (i) Tabela 26 para indicador ITE01; (ii) Tabela 27 para indicador ITE02; (iii) Tabela 28 para indicadores ITE03, ISO02 e

ISO03; (iv) Tabela 29 para indicadores IAM01, IAM02, IAM04, IAM05, IAM06 e IAM07; (v) Tabela 30 para indicador IAM03; e (vi) Tabela 31 para indicador ISO01.

Nota-se que, para a definição dos pesos de cada faixa de valor da escala de indicador, utilizou-se uma base “padrão” de julgamentos, conforme a escala de Saaty (1977) – mantendo sempre o grau de importância da faixa de melhor resultado à falta de pior resultado. A ordem da escala está apresentada iniciando com as condições ideais (condições prioritárias) – menor área, custo, manutenção, odor e proliferação de insetos e vermes, e maior eficiência na remoção de poluentes e maior simplicidade.

Em relação ao ITE01 (área utilizada), quanto menor a área, melhor é o sistema. Assim, os pesos de cada alternativa (a depender da faixa de valor em que se enquadra) em relação a este indicador está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador ITE01.

ITE01	0 – 3,20	3,21 – 6,40	6,41 – 9,60	9,61 – 12,80	12,80 – 16,00	Peso de cada faixa de valor	Peso normalizado
<b>0 – 3,20</b>	1	3	5	7	9	0,50	1,00
<b>3,21 – 6,40</b>	1/3	1	3	5	7	0,26	0,52
<b>6,41 – 9,60</b>	1/5	1/3	1	3	5	0,13	0,27
<b>9,61 – 12,80</b>	1/7	1/5	1/3	1	3	0,07	0,13
<b>12,80 – 16,00</b>	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,03	0,07
Peso máximo						0,50	
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )						5,24	
IC ( $IC \sim 0,00$ )						0,06	
RC ( $RC \leq 0,10$ )						0,05	

FONTE: Autoria própria (2021).

Em relação ao ITE02 (custo de implementação), quando menor o custo, melhor é o sistema na análise hierárquica. Desta forma, a Tabela 27 apresenta os pesos de cada alternativa (a depender da faixa de valor em que se enquadra) em relação a este indicador.

Para os indicadores ITE03 (frequência de manutenção), ISO02 (odor desagradável), e ISO03 (proliferação de insetos e vermes), considerou-se a mesma escala de dados qualitativos pois os melhores sistemas de tratamento são os com menor frequência de manutenção, menor odor e menor proliferação de insetos e vermes. Sendo assim, a Tabela 28 apresenta os pesos de

cada alternativa (a depender da faixa de valor em que se enquadra para o indicador em questão) em relação a este indicador.

Tabela 27 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador ITE02.

ITE02	100 – 350	351 – 700	701 – 1.050	1.051 – 1.400	1.401 – 1.750	Peso de cada faixa de valor	Peso normalizado
<b>100 – 350</b>	1	3	5	7	9	0,50	1,00
<b>351 – 700</b>	1/3	1	3	5	7	0,26	0,52
<b>701 – 1.050</b>	1/5	1/3	1	3	5	0,13	0,27
<b>1.051 – 1.400</b>	1/7	1/5	1/3	1	3	0,07	0,13
<b>1.401 – 1.750</b>	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,03	0,07
Peso máximo						0,50	
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )						5,24	
IC ( $IC \sim 0,00$ )						0,06	
RC ( $RC \leq 0,10$ )						0,05	

FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 28 – Matriz de comparação em pares da escala dos indicadores ITE03, ISO02 e ISO03.

ITE03 ISO02 ISO03	Muito baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	Peso de cada faixa de valor	Peso normalizado
<b>Muito baixo</b>	1	3	5	7	9	0,50	1,00
<b>Baixo</b>	1/3	1	3	5	7	0,26	0,52
<b>Moderado</b>	1/5	1/3	1	3	5	0,13	0,27
<b>Alto</b>	1/7	1/5	1/3	1	3	0,07	0,13
<b>Muito alto</b>	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,03	0,07
Peso máximo						0,50	
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )						5,24	
IC ( $IC \sim 0,00$ )						0,06	
RC ( $RC \leq 0,10$ )						0,05	

FONTE: Autoria própria (2021).

Para a maioria dos IAMs (todos, exceto IAM03 que é referente à remoção de CT), os dados de cada alternativa são referentes à porcentagem de remoção dos parâmetros avaliados nesta análise: DBO, DQO, SST,  $N_{am}$ ,  $N_{total}$  e  $P_{total}$ . Neste caso, considera-se que quanto maior é a remoção do parâmetro avaliado, melhor é o sistema de tratamento. Assim, as faixas de valores de maior porcentagem de remoção foram definidas como mais importantes em relação às faixas de valores de menor porcentagem de remoção. Os julgamentos realizados e os pesos calculados para cada faixa de valor para os indicadores IAM01, IAM02, IAM04, IAM05, IAM05, IAM06 e IAM07 estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Matriz de comparação em pares da escala dos indicadores IAM01, IAM02, IAM04, IAM05, IAM06 e IAM07.

IAM01 IAM02 IAM04 IAM05 IAM06 IAM07	100,0 – 81,0	80,0 – 61,0	60,0 – 41,0	40,0 – 21,0	20,0 – 0,0	Peso de cada faixa de valor	Peso normalizado
100,0 – 81,0	1	3	5	7	9	0,50	1,00
80,0 – 61,0	1/3	1	3	5	7	0,26	0,52
60,0 – 41,0	1/5	1/3	1	3	5	0,13	0,27
40,0 – 21,0	1/7	1/5	1/3	1	3	0,07	0,13
20,0 – 0,0	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,03	0,07
Peso máximo						0,50	
Autovalor ( $\lambda_{máx} \sim n$ )						5,24	
IC ( $IC \sim 0,00$ )						0,06	
RC ( $RC \leq 0,10$ )						0,05	

FONTE: Autoria própria (2021).

O indicador IAM03 (referente à remoção de CT), diferente dos demais indicadores ambientais, tem seus dados representados em unidade de log. Seguindo os julgamentos realizados para os demais indicadores ambientais, no indicador IAM03, quanto maior a unidade de log de remoção de CT, melhor é o sistema de tratamento de esgoto doméstico. A Tabela 30 apresenta os julgamentos realizados e os pesos calculados para IAM03.

Por fim, assim como os indicadores ITE3, ISO02 e ISO03, o indicador ISO01 possui escala qualitativa para comparação. Porém, diferente dos indicadores citados, o ISO01 (simplicidade do sistema) possui sua escala de forma contrária: quanto maior a simplicidade,

melhor é o sistema e mais importante será comparado com os demais. A Tabela 31 apresenta os pesos calculados, com base nos julgamentos realizados na escala deste indicador.

Tabela 30 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador IAM03.

IAM03	4,0 – 3,1	3,0 – 2,1	2,0 – 1,1	1,0 – 0,0	Peso de cada faixa de valor	Peso normalizado
4,0 – 3,1	1	3	5	7	0,56	1,00
3,0 – 2,1	1/3	1	3	5	0,26	0,47
2,0 – 1,1	1/5	1/3	1	3	0,12	0,22
1,0 – 0,0	1/7	1/5	1/3	1	0,06	0,10
Peso máximo					0,56	
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )					4,12	
IC ( $IC \sim 0,00$ )					0,04	
RC ( $RC \leq 0,10$ )					0,04	

FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 31 – Matriz de comparação em pares da escala do indicador ISO01.

ISO01	Muito alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Peso de cada faixa de valor	Peso normalizado
Muito alta	1	3	5	7	9	0,50	1,00
Alta	1/3	1	3	5	7	0,26	0,52
Moderada	1/5	1/3	1	3	5	0,13	0,27
Baixa	1/7	1/5	1/3	1	3	0,07	0,13
Muito baixa	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,03	0,07
Peso máximo					0,50		
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )					5,24		
IC ( $IC \sim 0,00$ )					0,06		
RC ( $RC \leq 0,10$ )					0,05		

FONTE: Autoria própria (2021).

Destá forma, os pesos normalizados foram atribuídos conforme a correspondência de cada dado da alternativa nas faixas de valores dos indicadores para o nível 3 de avaliação (comparação das alternativas em relação à cada indicador).

Por exemplo: em relação ao indicador ITE01, o sistema TSE + SACv + SACH necessita de 8,3 a 14,8 m<sup>2</sup>/hab para sua implantação. Quando calculado para o Cenário Base, o valor médio da faixa foi utilizado (11,55 m<sup>2</sup>/hab) correspondendo ao peso normalizado de 0,13. Ao realizar a variação nos cenários de dados mínimos e máximos, o peso normalizado variou para 0,27 e 0,07, respectivamente. Esta é a variação de pesos de cada dado das alternativas, em relação às faixas de valores dos indicadores.

Na sequência, os pesos foram utilizadas para o cálculo das prioridades parciais (prioridade em cada critério) e prioridade global (considerando os três critérios).

### 5.2.1. Resultados da Análise Hierárquica: Cenário Base

Para o cálculo do Cenário Base, foram utilizados os valores médios de cada indicador em relação à cada alternativa para a atribuição dos pesos normalizados. Para o cálculo da prioridade parcial e global, os pesos dos critérios e indicadores apresentados anteriormente foram utilizados. Destaca-se que para os indicadores. Assim, a Tabela 32 apresenta as prioridades parciais e geral de cada alternativa, e a Figura 26 representa as prioridades em gráficos. Para a representação gráfica, as notas parciais e geral de prioridades foram normalizadas (dividida pela maior nota), para facilitar a visualização.

No CTE, o sistema RAF ficou em 1º lugar na hierarquia, seguido do sistema TSE + FAN e TSE + SACv (2º e 3º lugar, respectivamente). O sistema RAF possui melhor nota neste critério, pela melhor configuração: menor área (0,3 a 0,8 m<sup>2</sup>/hab; valor médio de 0,55 m<sup>2</sup>/hab), menor custo (300,00 a 500,00 R\$/hab; valor médio de 400,00 R\$/hab) e menor frequência de manutenção (critério *baixo*) (TONETTI *et al.*, 2018). O sistema TSE + FAN é uma configuração que apresentou baixo custo (200,00 a 600,00 R\$/hab; valor médio de 400,00 R\$/hab) e baixa frequência de manutenção – o aumento do seu custo (0,6 a 1,6 m<sup>2</sup>/hab; valor médio de 1,10 m<sup>2</sup>/hab) difere este sistema do sistema RAF (TONETTI *et al.*, 2018). Ocupando o 3º lugar na hierárquica do CTE, o sistema TSE + SACv apresentou valores moderados para custo (400,00 a 800,00 R\$/hab; valor médio de 600,00 R\$/hab), área necessária (3,3 a 4,8 m<sup>2</sup>/hab; valor médio de 4,05 m<sup>2</sup>/hab) e frequência de manutenção (conceito *moderado*) (TONETTI *et al.*, 2018). Destaca-se que com o maior número de etapas (TSE + FAN + SACv + SACH, por exemplo), há aumento no valor dos indicadores: informações de custo e área necessária se somam para as etapas, e em relação à frequência de manutenção é realizada a média.

Já no CAM, o sistema RAF + SACv foi o sistema com melhor nota dentre todos os avaliados – em 2º lugar está o sistema TSE + SACv + SACH, e em 3º lugar o sistema TSE + FAN + FAR. Ambos os sistemas RAF + SACv e TSE + SACv + SACH são os sistemas com maiores taxas de remoção de poluentes avaliados no CAM – sendo que RAF + SACv prevalece na maioria dos indicadores ambientais: na remoção de nutrientes (valores médios de remoção de 92,12% de  $N_{am}$ , 98,39% de  $N_{total}$  e 99,60% de  $P_{total}$ ), na remoção de DBO (em média 94,75%) e remoção de SST (em média 96,70%), sendo o motivo por estar na primeira posição (MELLO, 2013; VON SPERLING, 2014). Destaca-se que grande parte dos IAMs para este sistema foram adaptados com dados de Von Sperling (2014). Para o sistema TSE + SACv + SACH (em 2º lugar) os IAMs também apresentam alta eficiência de remoção de poluentes. O sistema apresentou em média remoção de 98,23% de DBO, 95,18% de DQO, 86,87% de SST, 83,95% de  $N_{am}$ , 44,40% de  $N_{total}$ , 36,27% de  $P_{total}$ , e 3 unid. log de CF (MONTEIRO *et al.*, 2015; VON SPERLING, 2014). Em 3º lugar, o sistema TSE + FAN + FAR também apresentou altas taxas de remoção de matéria orgânica e sólidos, e moderada eficiência na remoção de nutrientes: remoção média de 95,42% de DBO, 92,64% de DQO, 2,17 unid. log de CF, 94,61% de SST, 61,44% de  $N_{am}$ , 13,80% de  $N_{total}$ , 44,50% de  $P_{total}$  (TONON *et al.*, 2015; GOMES, 2015; CRUZ, 2009).

No CSO, o sistema TSE + FAN é o primeiro sistema no *ranking* deste critério, seguido de RAF (2º lugar) e TSE + SACv e TSE + SACH (ambos em 3º lugar). Mesmo não tendo o melhor conceito nos indicadores de ISO02 (“moderado” em odor desagradável) e ISO03 (“baixo” para proliferação de insetos e vermes), TSE + FAN possui o melhor conceito para simplicidade (“muito alta”) e, por isso, prevaleceu aos demais sistemas. RAF também possui bons conceitos para a avaliação: “baixo” para ISO02, “muito baixo” para proliferação de insetos e vermes, e “alta” para simplicidade – ficando na 2ª posição do *ranking*. Os sistemas TSE + SACv e TSE + SACH possuem os mesmos conceitos para os ISOs, e por este motivo mantiveram a mesma nota. Na análise hierárquica, estão em 3º lugar pois possuem simplicidade “alta”, mas perdem para o RAF nos demais indicadores.

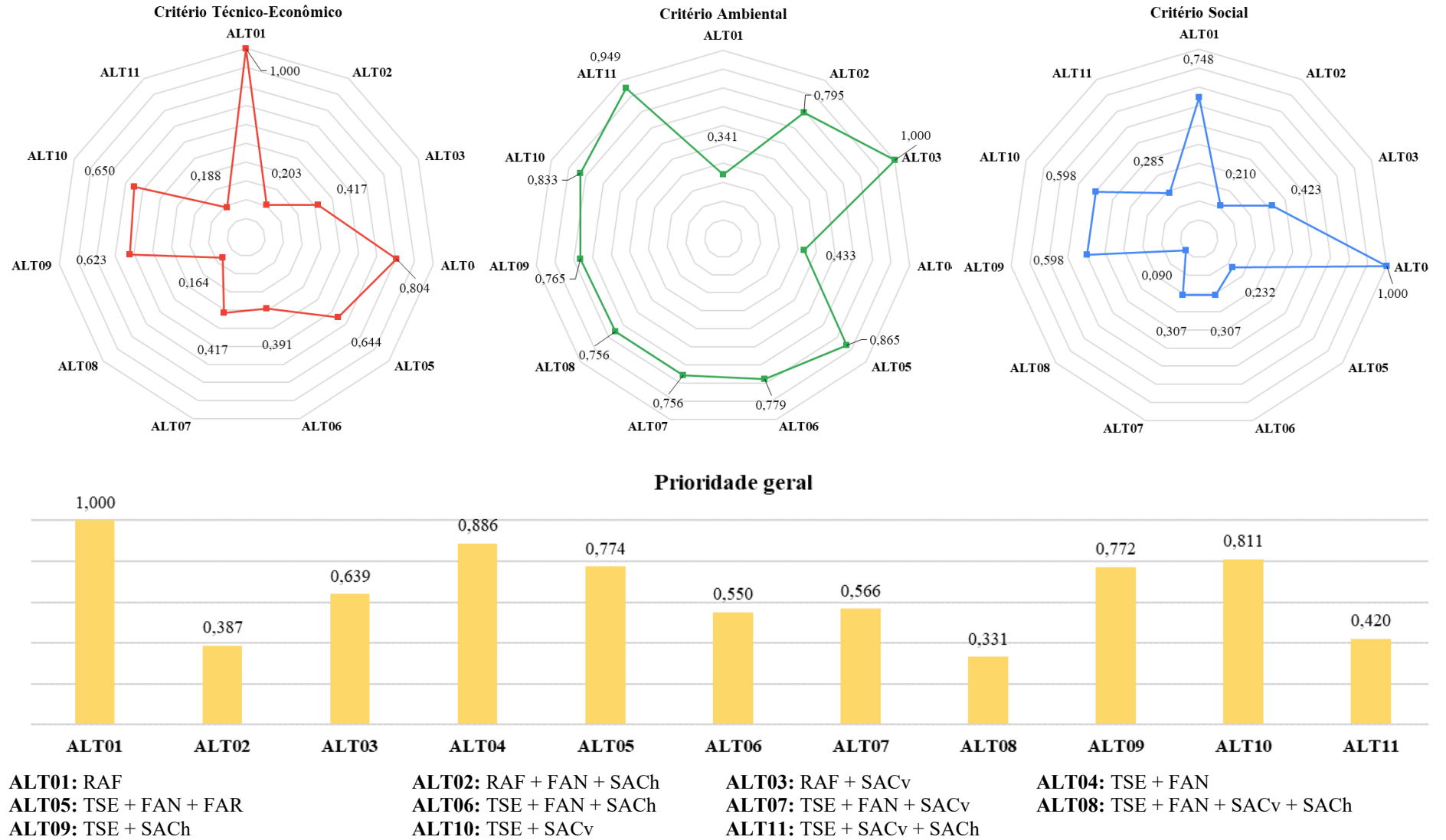
Por fim, na prioridade geral, RAF manteve a posição em 1º lugar, seguido de TSE + FAN no 2º lugar e TSE + SACv no 3º lugar. Sendo que, dentre os critérios utilizados na análise, o CTE é o critério com maior peso, a hierarquia na prioridade geral do Cenário Base seguiu a hierarquia do CTE – com diferentes notas, ao avaliar os demais critérios em conjunto, mas com similar ordem hierárquica.

Tabela 32 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário base.

Soluções	Cenário Base							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,1818	1,0000	0,0413	0,3414	0,1559	0,7480	0,1401	1,0000
RAF + FAN + SACH	0,0369	0,2030	0,0962	0,7954	0,0437	0,2097	0,0542	0,3866
RAF + SACv	0,0759	0,4173	0,1209	1,0000	0,0882	0,4233	0,0895	0,6388
TSE + FAN	0,1461	0,8036	0,0523	0,4330	0,2084	1,0000	0,1242	0,8860
TSE + FAN + FAR	0,1171	0,6440	0,1046	0,8648	0,0483	0,2318	0,1085	0,7739
TSE + FAN + SACH	0,0710	0,3906	0,0941	0,7788	0,0641	0,3074	0,0770	0,5498
TSE + FAN + SACv	0,0759	0,4173	0,0914	0,7559	0,0641	0,3074	0,0794	0,5665
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0297	0,1635	0,0914	0,7559	0,0189	0,0905	0,0464	0,3309
TSE + SACH	0,1133	0,6234	0,0924	0,7646	0,1246	0,5979	0,1082	0,7724
TSE + SACv	0,1182	0,6500	0,1007	0,8325	0,1246	0,5979	0,1137	0,8113
TSE + SACv + SACH	0,0342	0,1881	0,1148	0,9493	0,0595	0,2853	0,0588	0,4199

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 26 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário base.



FONTE: Autoria própria (2021).

### 5.2.2. Resultados da Análise Hierárquica: Cenário de Sensibilidade dos Dados

Para o cenário de sensibilidade dos dados, foram elaboradas as análises hierárquicas com os valores máximos e mínimos de cada alternativa – de forma a avaliar a interferência que dos dados utilizados para cada alternativa. Contudo, visto que o sistema RAF + SACv não possuem faixas de valores ou desvio padrão para a maioria de seus IAMs, não é possível abranger tal configuração de tratamento neste formato do cenário (não seria possível a utilização de valores máximos e mínimos). Sendo assim, além da análise hierárquica com os valores máximos e mínimos, a análise hierárquica com valores médios foi recalculada para a comparação conjunta.

Os valores médios, máximos e mínimos foram calculados e utilizados nos ITEs e IAMs. Para os ISOs, os conceitos foram alterados em um grau, para validar como os valores máximos e mínimos. Assim, a Tabela 33 e Figura 27 apresentam as informações para os valores médios, a Tabela 34 e Figura 28 apresentam as informações para os valores máximos, e a Tabela 35 e Figura 29 apresentam as informações para os valores mínimos.

Em relação aos valores médios, a retirada de RAF + SACv apresentou uma pequena variação nas notas parciais e finais para CTE e CSO, mas não resultou em alteração da hierarquia, mantendo RAF em 1º lugar, TSE + FAN em 2º lugar e TSE + SACv em 3º lugar para o CTE, e mantendo TSE + FAN em 1º lugar, RAF em 2º lugar e TSE + SACH e TSE + SACv em 3º lugar para CSO.

Já no CAM, a retirada do sistema RAF + SACv (sistema que estava como 1º lugar no CAM no Cenário Base) alterou a ordem hierárquica tendo como os três principais sistemas em relação à CAM: TSE + SACv + SACH em 1º lugar, TSE + FAN + FAR em 2º lugar, e TSE + SACv em 3º lugar. Nesta alteração de alternativas avaliadas, os sistemas elevaram uma posição no *ranking* – sendo que TSE + SACv estava em 4º lugar no Cenário Base e com a retirada de RAF + SACv da análise, passou à 3º lugar. Este sistema, apresentou em média remoção de 86,98% de DBO, 87,98% de DQO, 93,30% de SST, 40,33% de  $N_{am}$ , 40,67% de  $N_{total}$ , 71,56% de  $P_{total}$ , e 3 unid. log de CF (PAROLIN *et al.*, 2012; PAGLIARINI JUNIOR *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2015; SILVEIRA E ARSEGO, 2014; VON SPERLING, 2014).

Mesmo com a alteração apresentada no CAM, a ordem hierárquica em relação à prioridade geral com os valores médios se manteve a mesma do Cenário Base, considerando apenas algumas alterações nas notas, pela retirada do sistema RAF + SACv deste Cenário.

Após o cálculo dos valores médios, a análise hierárquica foi realizada com os valores máximos e mínimos de cada sistema – para compor a análise de sensibilidade na alteração dos dados utilizados.

Ao avaliar os valores máximos, TSE + FAN e RAF ficaram ambos em 1º lugar no CTE. Apesar da diferença de dados para os dois sistemas – TSE + FAN com custo máximo de 600,00 R\$/hab, área utilizada máxima de 1,60 m<sup>2</sup>/hab, e conceito *muito baixo* em frequência de manutenção, e RAF com custo máximo de 500,00 R\$/hab, área utilizada máxima de 0,80 m<sup>2</sup>/hab, e conceito *muito baixo* em frequência de manutenção (TONETTI *et al.*, 2018) – ambos se enquadram na mesma faixa de valores para atribuição dos pesos normalizados e, conseqüentemente, obtiveram a mesma nota no CTE. Na sequência hierárquica, TSE + SACv ficou em 2º lugar e TSE + SACH em 3º lugar no CTE.

Já no CAM para os valores máximos, a hierarquia seguiu a mesma dos valores médios, com TSE + SACv + SACH em 1º lugar, TSE + FAN + FAR em 2º lugar e TSE + SACv em 3º lugar (apenas com uma pequena alteração nas notas parciais para o critério). No CSO avaliado com os valores máximos de cada alternativa, houve uma pequena alteração na prioridade onde RAF ocupou o 1º lugar (sistema que estava no 2º lugar na rodada dos valores médios), em 2º lugar estão os sistemas TSE + FAN, TSE + SACH e TSE + SACv, e em 3º lugar os sistemas TSE + FAN + SACv e TSE + FAN + SACH. Conforme apresentado no item 4.2.4, para a avaliação dos valores máximos e mínimos no CSO, cada informação de cada alternativa foi alterada em um grau na escala qualitativa. Contudo, para os valores que já possuíam o conceito máximo (por exemplo, “*muito alto*” para simplicidade), o valor continuou o mesmo. Este é o motivo para diversos sistemas apresentarem mesma nota. Na prioridade geral, a hierarquia alterou-se de forma que o sistema RAF ficou em 1º lugar, TSE + FAN em 2º lugar e TSE + SACv em 3º lugar – ainda seguindo a ordenação do CTE (critério com maior peso para a atribuição da nota/prioridade geral).

Ao avaliar os valores mínimos, os resultados das prioridades parciais e prioridade geral também tiveram alterações. No CTE, RAF manteve a posição de 1º lugar, TSE + FAN em 2º lugar (conforme rodada de valores médios) e TSE + FAN + FAR em 3º lugar. A etapa de SAC nos sistemas fez com que os valores de área utilizada (valor mínimo de 3,30 m<sup>2</sup>/hab para TSE + SACv e valor mínimo de 5,80 m<sup>2</sup>/hab para TSE + SACH) e custo (valor mínimo de 400,00 R\$/hab, tanto para TSE + SACv quanto para TSE + SACH) resultassem em valores maiores do que os valores mínimos de TSE + FAN + FAR (área utilizada mínima de 1,00 m<sup>2</sup>/hab e custo mínimo de 300,00 R\$/hab) (TONETTI *et al.*, 208). Isto fez com que TSE + FAN + FAR tivesse

melhor posição em comparação aos sistemas conjuntos entre TSE e SAC, que estavam entre os melhores sistemas anteriormente.

No CAM para valores mínimos, TSE + SACv + SACH manteve o 1º lugar, mas o 2º lugar alterou para o sistema TSE + SACv (o qual estava em 3º lugar na rodada dos valores médios e máximos), e o 3º lugar foi para o sistema TSE + SACH. O sistema TSE + SACH, mesmo que não esteja entre os três primeiros colocados nas rodadas anteriores, apresenta moderadas faixas de eficiência de remoção de poluentes, sendo: 85,17% para DBO, 81,89% para DQO, 1,67 unid. log de CF, 85,60% de SST, 36,12% de  $N_{am}$ , 22,15% de  $N_{total}$ , e 25,28% de  $P_{total}$  (SCHIMMER *et al.*, 2009; SEZERINO *et al.*, 2015; PHILIPPI *et al.*, 2006; VON SPERLING, 2014).

Para o CSO, em relação aos valores mínimos, os dados utilizados para análise mantiveram a mesma variação indicada nos valores máximos (mas neste momento reduzindo um grau na escala). Nestas condições de avaliação, a hierarquização do CSO se manteve similar ao Cenário Base, com o sistema TSE + FAN em 1º lugar, o sistema RAF em 2º lugar e os sistemas TSE + SACH e TSE + SACv em 3º lugar. Não houve grandes variações para este critério na rodada de valores mínimos.

Para a prioridade geral em relação aos valores mínimos, a ordem foi alterada para TSE + FAN em 1º lugar, RAF em 2º lugar e TSE + FAN + FAR em 3º lugar – por conta de o CTE ter maior peso entre os critérios, este prevalece em compensação aos demais critérios e indicadores, e a hierarquização se manteve conforme para CTE.

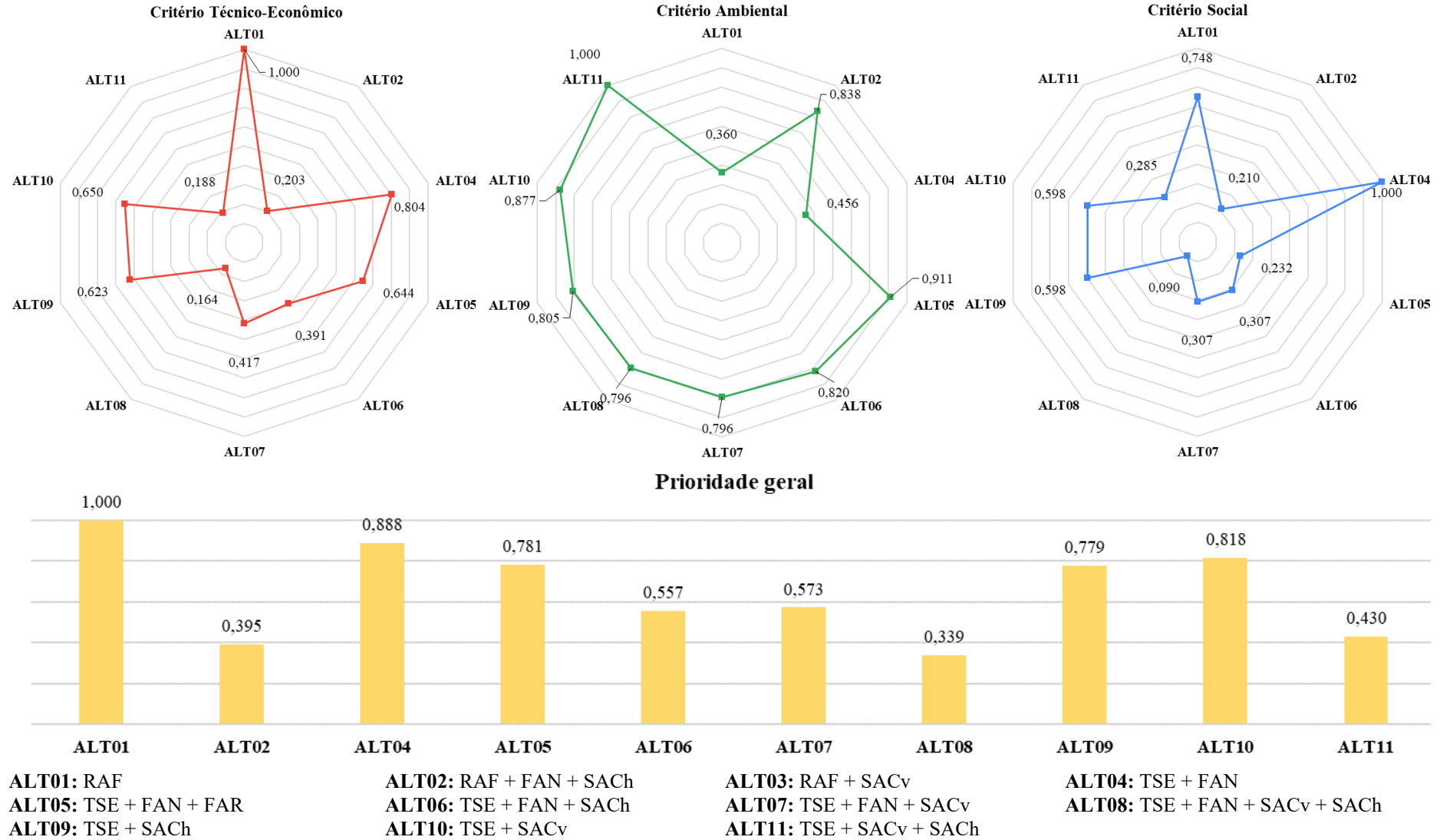
Durante o desenvolvimento e obtenção de dados para esta análise da sensibilidade (calculando a hierarquia com valores médios, máximos e mínimos), nota-se a grande interferência de resultados obtidos conforme os valores utilizados no cálculo. Principalmente em relação ao CAM, visto que cada alternativa possui dados diferentes de remoção de poluentes (dados de cada IAMs) este critério foi o que mais sofreu alterações durante as diferentes rodadas de cálculos para a hierarquia dos sistemas. Este Cenário permitiu observar e concluir sobre a importância dos dados utilizados durante o processo de análise hierárquica – uma informação alterada, pode impactar em toda a hierarquia estabelecida.

Tabela 33 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos dados 01 – valores médios.

Soluções	Cenário de Sensibilidade dos Dados – Valores Médios							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,1967	1,0000	0,0470	0,3597	0,1709	0,7480	0,1525	1,0000
RAF + FAN + SACH	0,0399	0,2030	0,1094	0,8380	0,0479	0,2097	0,0602	0,3947
RAF + SACv	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN	0,1581	0,8036	0,0595	0,4562	0,2285	1,0000	0,1354	0,8882
TSE + FAN + FAR	0,1267	0,6440	0,1189	0,9110	0,0530	0,2318	0,1190	0,7809
TSE + FAN + SACH	0,0768	0,3906	0,1071	0,8204	0,0703	0,3074	0,0849	0,5570
TSE + FAN + SACv	0,0821	0,4173	0,1040	0,7963	0,0703	0,3074	0,0874	0,5733
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0322	0,1635	0,1040	0,7963	0,0207	0,0905	0,0516	0,3386
TSE + SACH	0,1226	0,6234	0,1051	0,8054	0,1366	0,5979	0,1187	0,7787
TSE + SACv	0,1279	0,6500	0,1145	0,8771	0,1366	0,5979	0,1247	0,8182
TSE + SACv + SACH	0,0370	0,1881	0,1305	1,0000	0,0652	0,2853	0,0655	0,4299

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 27 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade dos dados – valores médios.



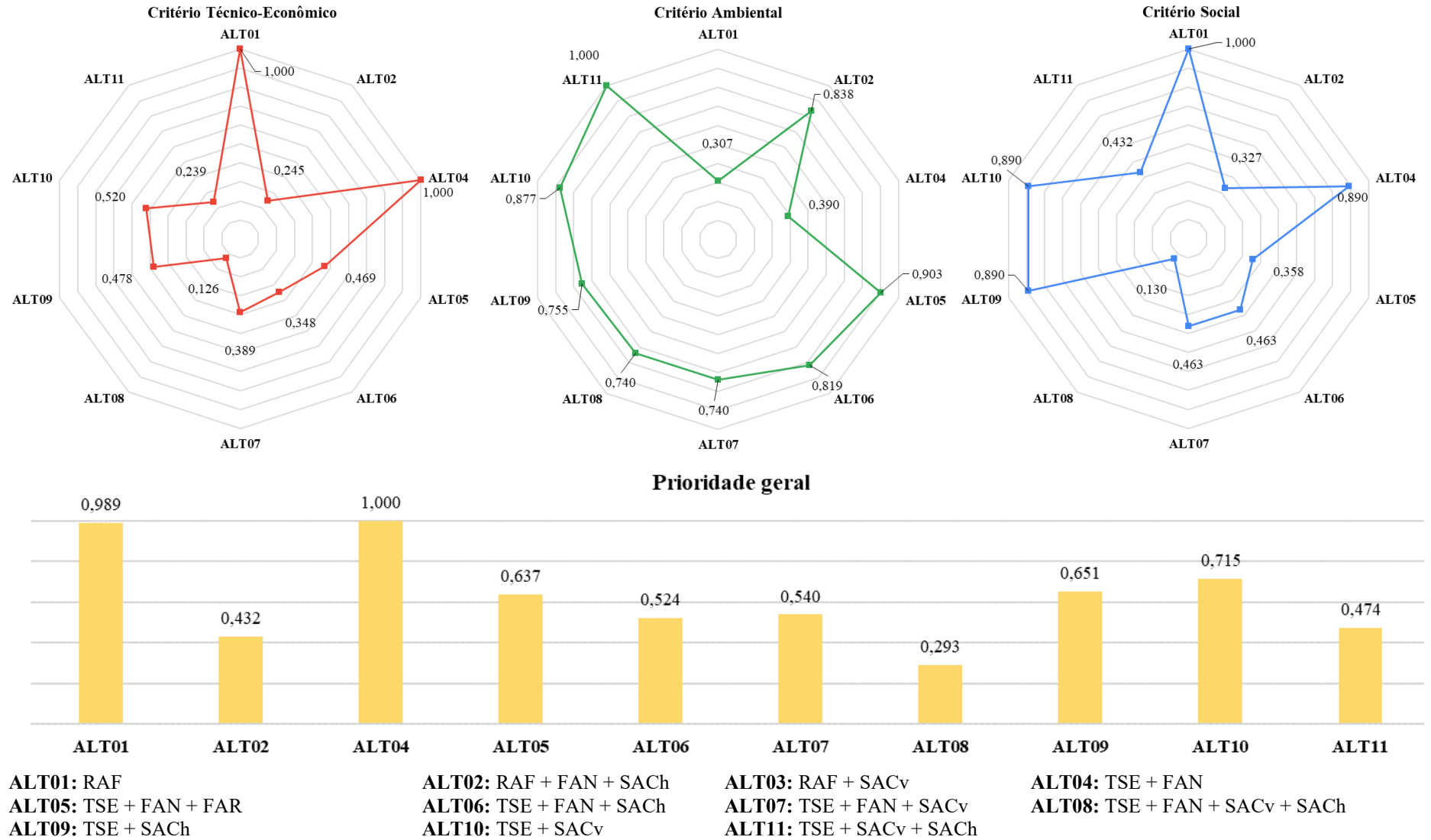
FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 34 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos dados – valores máximos.

Soluções	Cenário de Sensibilidade dos Dados – Valores Máximos							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,2078	1,0000	0,0417	0,3073	0,1712	1,0000	0,1581	0,9889
RAF + FAN + SACH	0,0510	0,2454	0,1137	0,8380	0,0561	0,3275	0,0691	0,4322
RAF + SACv	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN	0,2078	1,0000	0,0529	0,3901	0,1523	0,8897	0,1599	1,0000
TSE + FAN + FAR	0,0973	0,4686	0,1225	0,9031	0,0613	0,3580	0,1018	0,6368
TSE + FAN + SACH	0,0722	0,3477	0,1111	0,8186	0,0792	0,4625	0,0837	0,5238
TSE + FAN + SACv	0,0809	0,3893	0,1004	0,7400	0,0792	0,4625	0,0863	0,5397
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0261	0,1258	0,1004	0,7400	0,0223	0,1300	0,0469	0,2931
TSE + SACH	0,0993	0,4780	0,1025	0,7554	0,1523	0,8897	0,1041	0,6513
TSE + SACv	0,1080	0,5196	0,1190	0,8766	0,1523	0,8897	0,1143	0,7152
TSE + SACv + SACH	0,0496	0,2390	0,1357	1,0000	0,0740	0,4320	0,0758	0,4740

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 28 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade dos dados – valores máximos.



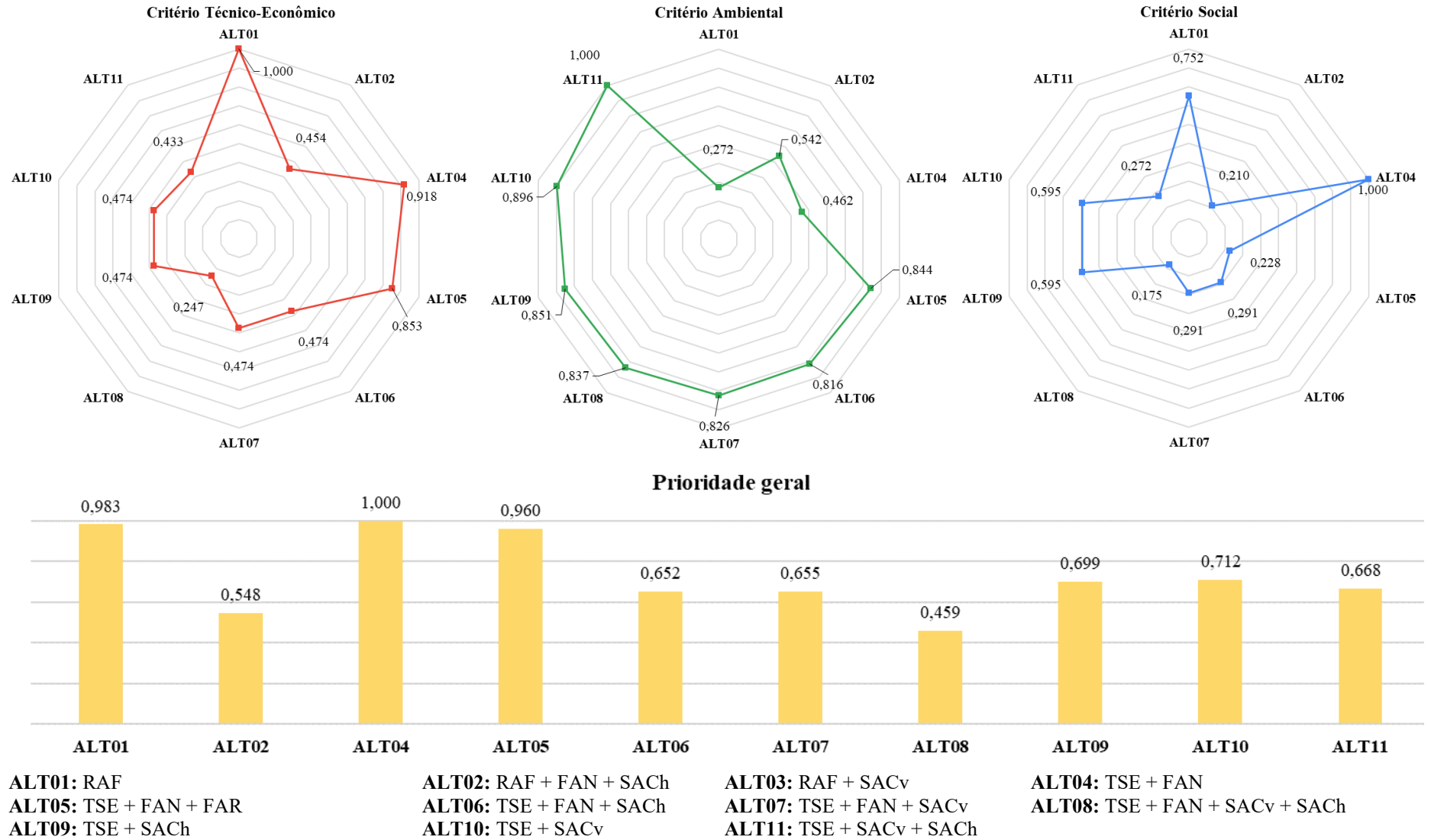
FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 35 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos dados – valores mínimos.

Soluções	Cenário de Sensibilidade dos Dados – Valores Mínimos							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,1724	1,0000	0,0370	0,2721	0,1706	0,7517	0,1340	0,9826
RAF + FAN + SACH	0,0783	0,4544	0,0738	0,5422	0,0475	0,2096	0,0748	0,5485
RAF + SACv	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN	0,1583	0,9182	0,0628	0,4616	0,2269	1,0000	0,1363	1,0000
TSE + FAN + FAR	0,1470	0,8527	0,1149	0,8440	0,0517	0,2279	0,1309	0,9600
TSE + FAN + SACH	0,0817	0,4741	0,1110	0,8157	0,0659	0,2907	0,0888	0,6517
TSE + FAN + SACv	0,0817	0,4741	0,1124	0,8258	0,0659	0,2907	0,0892	0,6545
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0426	0,2470	0,1139	0,8370	0,0397	0,1751	0,0625	0,4588
TSE + SACH	0,0817	0,4741	0,1158	0,8510	0,1350	0,5948	0,0953	0,6990
TSE + SACv	0,0817	0,4741	0,1220	0,8964	0,1350	0,5948	0,0970	0,7118
TSE + SACv + SACH	0,0746	0,4331	0,1361	1,0000	0,0618	0,2723	0,0911	0,6681

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 29 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade dos dados – valores mínimos.



FONTE: Autoria própria (2021).

### 5.2.3. Resultados da Análise Hierárquica: Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo (Aspectos Climáticos)

Outro cenário elaborado para a avaliação da variação dos resultados foi conforme a variação das informações para estudos encontrados em região de clima Cfa e clima Cfb. Para os demais cenários, os dados utilizados para cada alternativa foram baseados em médias considerando tanto os estudos de caso e projetos piloto localizados em municípios da região de Clima Cfa quanto de Clima Cfb – considerando uma avaliação em todo a região Cf (clima subtropical úmido, onde não há estação de seca).

Assim, a fim de avaliar a sensibilidade dos dados conforme a área de estudo, para este Cenário os dados foram avaliados separadamente, para a região de zona de verão quente (código Cfa) e para a região de zona de verão temperado (código Cfb). Para a avaliação dos dados neste Cenário, foram realizadas duas análises separadas:

- a) **Análise dos sistemas em município de clima Cfa:** avaliação de dados dos sistemas em municípios de clima Cfa, calculando a média em conjunto com os estudos situados em municípios de clima Cfb (quando existente), e sem os dados de sistemas situados em municípios de clima Cfb em conjunto;
- b) **Análise dos sistemas em município de clima Cfb:** avaliação de dados dos sistemas em municípios de clima Cfb, calculando a média em conjunto com os estudos situados em municípios de clima Cfa (quando existente), e sem os dados de sistemas situados em municípios de clima Cfa em conjunto;

Considerando que esta variação de informações das alternativas se refere apenas aos IAMs, apenas as alterações realizadas na prioridade parcial em relação ao CAM serão discutidas neste Cenário – as prioridades parciais de CTE e CSO não variam, e se mantém conforme apresentado no Cenário Base. Na avaliação dos sistemas existentes em municípios de clima Cfa, o sistema TSE + SACv + SACH foi eliminado da análise, pois os dados referentes a este sistema foram encontrados apenas em municípios de clima Cfb (MONTEIRO *et al.*, 2015). Assim, a Tabela 36 e a Figura 30 apresentam as prioridades parciais e prioridade geral para os valores médios de sistemas situados em região de clima Cfa e Cfb, e a Tabela 37 e a Figura 31 apresentam as informações apenas as médias referentes aos sistemas situados em região de clima Cfa.

Na prioridade parcial para o CAM (para os valores médios considerando dados de sistemas em municípios de clima Cfb), o sistema RAF + SACv manteve em 1º lugar (conforme Cenário Base), TSE + FAN + FAR passou a 2º lugar (o sistema estava em 3º lugar no Cenário Base), e TSE + SACv passou a 3º lugar no *ranking* de prioridades. A alteração ocorrida na hierarquia do CAM para esta etapa foi pela retirada do sistema TSE + SACv + SACH (sistema que está em 2º lugar no Cenário Base). O sistema TSE + SACv, assim como os demais citados, possui grandes faixas de eficiência na remoção de poluentes – destaca-se que esta configuração também está presente entre as três melhores para o Cenário de Sensibilidade de Dados para valores mínimos e médios (neste caso, devido à retirada do sistema RAF + SACv da análise).

Quando a hierarquização é calculada para CAM apenas com os dados referentes à estudos existentes em municípios de clima Cfa, o 3º lugar da hierarquia alterou de TSE + SACv para RAF + FAN + SACH – demonstrando que há interferência no resultado do método de análise hierárquica conforme os dados selecionados para avaliação.

Kohler *et al.* (2015) em seu sistema RAF + FAN + SACH em Vera Cruz (RS), município localizado em região de clima Cfa, obteve eficiência de remoção média de 91,79% de DBO, 88,97% de DQO e 74,85% de  $P_{total}$ . Assim como Zerwes (2013) – mesmo sistema e mesmo município – obteve eficiência média de remoção de 98,59% de DBO, 94,44% de DQO e 90,03% de  $P_{total}$ . Por outro lado, Silva (2018), em seu sistema projetado em Monte Carlo (SC), município localizado em região de clima Cfb, obteve eficiência de remoção média de 58,76% de DBO, 64,91% de DQO, e 73,90% de  $P_{total}$ . A retirada do estudo de Silva (2018) no cálculo, elevou a eficiência média do sistema RAF + FAN + SACH. Destaca-se que, algumas informações não houveram alteração nos IAMs pela utilização de dados consolidados na literatura (VON SPERLING, 2014; DOTRO *et al.*, 2017), ou pelo banco de dados possui informação de sistemas existentes apenas em regiões de clima Cfa.

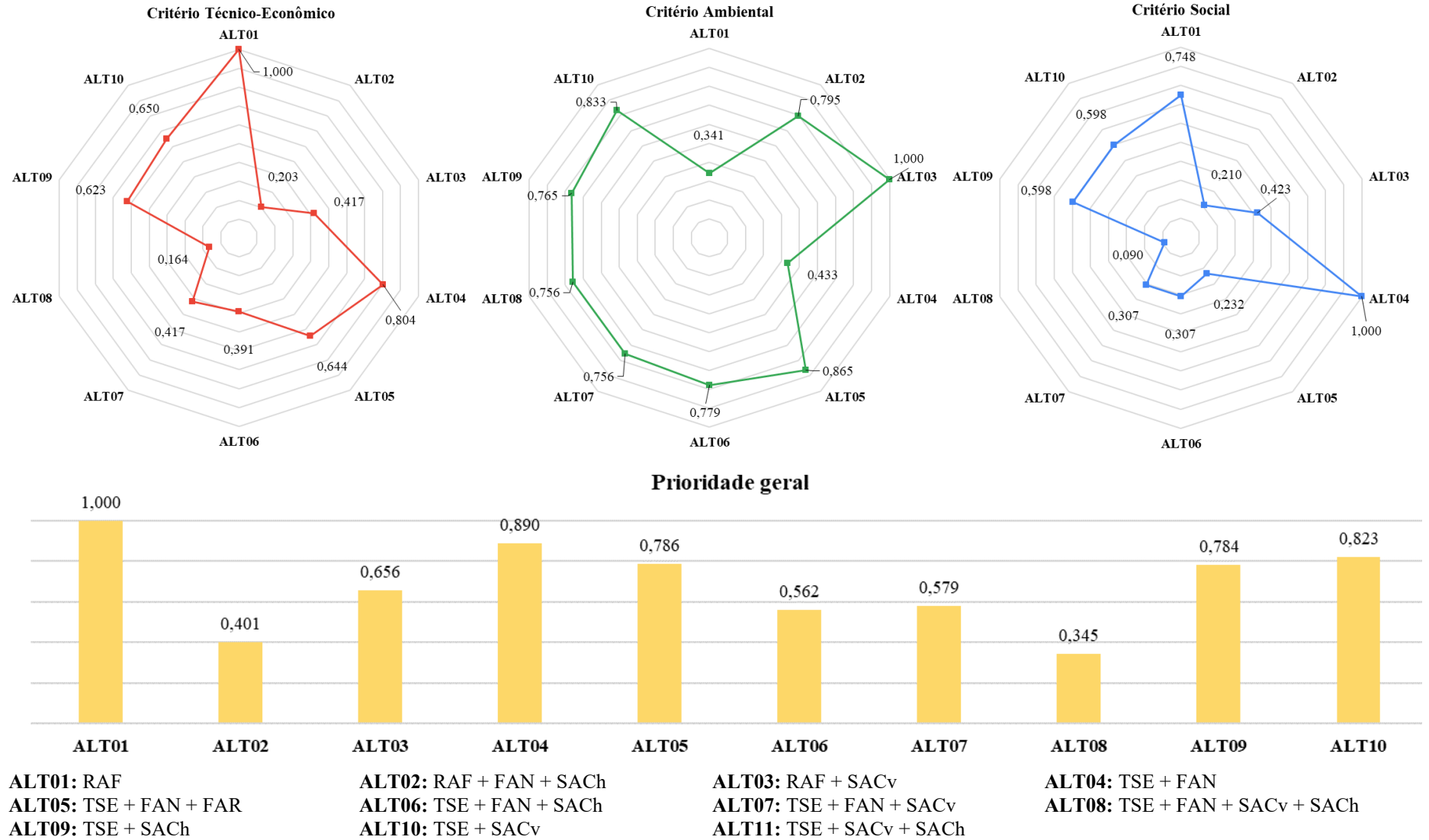
Avaliando os dados para a prioridade geral, a hierarquização se manteve conforme Cenário Base: RAF em 1º lugar, TSE + FAN em 2º lugar e TSE + SACv em 3º lugar. Apesar da alteração ocorrida no CAM, a hierarquização parcial conforme CTE prevalece aos demais na prioridade geral, devido ao peso do critério.

Tabela 36 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb).

Soluções	Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo – Valores Médios (Cfa + Cfb)							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,1882	1,0000	0,0466	0,3414	0,1657	0,7480	0,1465	1,0000
RAF + FAN + SACH	0,0382	0,2030	0,1086	0,7954	0,0464	0,2097	0,0587	0,4009
RAF + SACv	0,0786	0,4173	0,1366	1,0000	0,0938	0,4233	0,0961	0,6558
TSE + FAN	0,1513	0,8036	0,0591	0,4330	0,2215	1,0000	0,1304	0,8899
TSE + FAN + FAR	0,1212	0,6440	0,1181	0,8648	0,0513	0,2318	0,1152	0,7861
TSE + FAN + SACH	0,0735	0,3906	0,1064	0,7788	0,0681	0,3074	0,0824	0,5625
TSE + FAN + SACv	0,0786	0,4173	0,1032	0,7559	0,0681	0,3074	0,0848	0,5785
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0308	0,1635	0,1032	0,7559	0,0200	0,0905	0,0505	0,3445
TSE + SACH	0,1173	0,6234	0,1044	0,7646	0,1325	0,5979	0,1148	0,7835
TSE + SACv	0,1224	0,6500	0,1137	0,8325	0,1325	0,5979	0,1207	0,8235
TSE + SACv + SACH	-	-	-	-	-	-	-	-

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 30 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb).



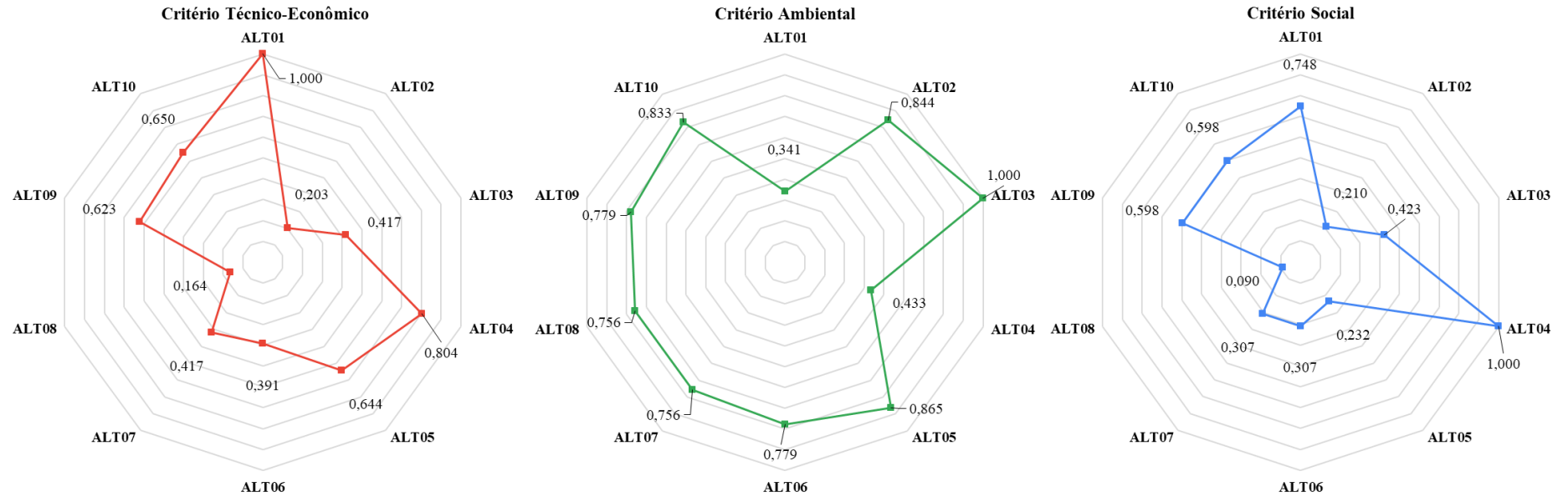
FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 37 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa).

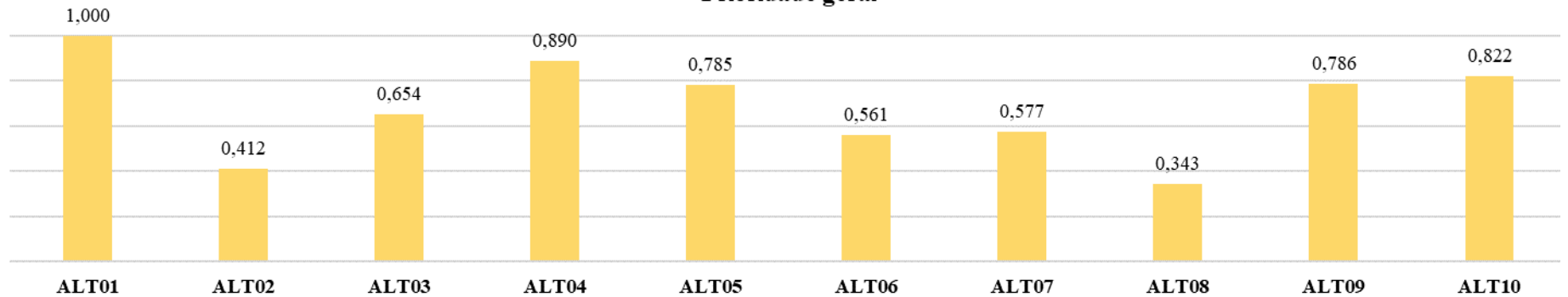
Soluções	Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo – Valores Médios (Cfa)							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,1882	1,0000	0,0462	0,3414	0,1657	0,7480	0,1464	1,0000
RAF + FAN + SACH	0,0382	0,2030	0,1143	0,8441	0,0464	0,2097	0,0603	0,4122
RAF + SACv	0,0786	0,4173	0,1354	1,0000	0,0938	0,4233	0,0958	0,6541
TSE + FAN	0,1513	0,8036	0,0586	0,4330	0,2215	1,0000	0,1302	0,8896
TSE + FAN + FAR	0,1212	0,6440	0,1171	0,8648	0,0513	0,2318	0,1149	0,7848
TSE + FAN + SACH	0,0735	0,3906	0,1054	0,7788	0,0681	0,3074	0,0822	0,5612
TSE + FAN + SACv	0,0786	0,4173	0,1024	0,7559	0,0681	0,3074	0,0845	0,5773
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0308	0,1635	0,1024	0,7559	0,0200	0,0905	0,0502	0,3431
TSE + SACH	0,1173	0,6234	0,1054	0,7788	0,1325	0,5979	0,1151	0,7861
TSE + SACv	0,1224	0,6500	0,1127	0,8325	0,1325	0,5979	0,1204	0,8222
TSE + SACv + SACH	-	-	-	-	-	-	-	-

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 31 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa).



**Prioridade geral**



**ALT01:** RAF  
**ALT05:** TSE + FAN + FAR  
**ALT09:** TSE + SACH

**ALT02:** RAF + FAN + SACH  
**ALT06:** TSE + FAN + SACH  
**ALT10:** TSE + SACv

**ALT03:** RAF + SACv  
**ALT07:** TSE + FAN + SACv  
**ALT11:** TSE + SACv + SACH

**ALT04:** TSE + FAN  
**ALT08:** TSE + FAN + SACv + SACH

FONTE: Autoria própria (2021).

Em seguida, a análise hierárquica foi realizada com foco nos dados de estudos de caso e projetos piloto existentes em regiões de clima Cfb – avaliando, quanto existente, a média de informações com e sem os dados de estudos e projetos em regiões de clima Cfa. Visto que alguns sistemas do banco de dados possuem apenas estudos em Cfa, os sistemas RAF, RAF + FAN + SACH, RAF + SACv, TSE + FAN, TSE + FAN + FAR, TSE + FAN + SACv, TSE + FAN + SACv + SACH foram retirados da análise. Assim, a Tabela 38 e a Figura 32 apresentam as prioridades parciais e prioridade geral para os valores médios de sistemas situados em região de clima Cfb e Cfa, e a Tabela 39 e a Figura 33 apresentam as informações apenas as médias referentes aos sistemas situados em região de clima Cfb.

A retirada de várias alternativas na análise hierárquica alterou também a prioridade parcial de CTE e CSO. No CTE, TSE + SACv passou à 1º lugar, o sistema TSE + SACH em 2º lugar e o sistema TSE + FAN + SACH em 3º lugar. A área reduzida de um sistema SACv prevaleceu às etapas de SACH e FAN nas outras alternativas.

Em relação ao CSO, TSE + SACv e TSE + SACH ficaram ambas em 1º lugar (conceito “*alta*” para simplicidade, “*moderado*” para odor desagradável e “*baixo*” para proliferação de insetos e vermes), TSE + FAN + SACH em 2º lugar (conceito “*moderada*” para simplicidade, “*alto*” para odor desagradável e “*moderado*” para proliferação de insetos e vermes), e TSE + SACv + SACH em 3º lugar (conceito “*moderada*” para simplicidade, “*alto*” para odor desagradável, e “*alto*” para proliferação de insetos e vermes).

Para o CAM, a hierarquização também sofreu grandes alterações pela retirada de diversas alternativas da análise.

Quando avaliados os dados médios com referências tanto em região de clima Cfb quanto Cfa: (i) o sistema TSE + SACv + SACH ficou em 1º lugar – valores médios de eficiência de remoção de 98,23% de DBO, 95,18% de DQO, 3 unid. log de CF, 86,87% de SST, 83,95% de  $N_{am}$ , 44,40% de  $N_{total}$ , 36,27% de  $P_{total}$  (MONTEIRO *et al.*, 2015; VON SPERLING, 2014); (ii) o sistema TSE + SACv ficou em 2º lugar – com valores médios de eficiência de remoção de 86,98% de DBO, 87,98% de DQO, 3 unid. log de CF, 93,30% de SST, 40,33% de  $N_{am}$ , 40,67% de  $N_{total}$ , 78,56% de  $P_{total}$  (PAROLIN *et al.*, 2012; PAGLIARINI JUNIOR *et al.*, 2011; MONTEIRO *et al.*, 2015; SILVEIRA e ARSEGO, 2014; VON SPERLING, 2014); e (iii) o sistema RAF + FAN + SACH em 3º lugar – valores médios de eficiência de remoção de 83,05% de DBO, 82,77% de DQO, 2 unid. log de CF, 98,35% de SST, 37,50% de  $N_{am}$ , 42,0% de  $N_{total}$ , 79,59% de  $P_{total}$  (KOHLENER *et al.*, 2015; ZERWES, 2013; SILVA, 2018, DOTRO *et al.*, 2017; VON SPERLING, 2014).

Ao ser realizada a análise hierárquica retirando os dados de sistemas existentes em regiões de clima Cfa, o CAM foi alterado para TSE + SACv + SACH em 1º lugar, TSE + SACv em 2º lugar e TSE + FAN + SACH em 3º lugar. A hierarquia alterou-se pela variação ocorrida nos dados. Para o sistema RAF + FAN + SACH, os dados foram alterados pela retirada das informações de Kohler *et al.* (2015) e Zerwes (2013) – ambos estudos em regiões de clima Cfa – mantendo o sistema com as eficiências de 58,76% de remoção de DBO, 64,91% de DQO, e 73,90% de  $P_{total}$  (SILVA, 2018).

Já para o sistema TSE + FAN + SACH, os estudos em regiões de clima Cfb prevaleceram as eficiências do sistema anterior, onde: Nava e Lima (2012) obtiveram em média 92% de eficiência de remoção de DBO em seu sistema de TSE + FAN + SACH em Caçador (SC). Rodrigues *et al.* (2015) obtiveram em média 94,23% de eficiência de remoção de DBO em seu sistema composto por TSE + FAN + SACH implementado em Doutor Ricardo (RS). Rosa *et al.* (2020) obtiveram em média eficiências de 85,54% de remoção de DBO, 85,35% de remoção de DQO, 0,56 unid. log de remoção e CF, e 22,11% de remoção de  $N_{am}$ .

Como prioridade geral nesta análise, TSE + SACv ficou em 1º lugar, TSE + SACH em 2º lugar e TSE + FAN + SACH em 3º lugar – mantendo a hierarquia conforme a prioridade parcial do CTE. A alteração apresentada na prioridade geral desta rodada se dá apenas pela retirada de diversos sistemas da avaliação, inclusive o sistema RAF que se manteve em 1º lugar em diversas rodadas de cálculo da análise hierárquica.

Pelo CAM (critério em que variações nos dados utilizados ocorreram, conforme região de clima), nota-se que há interferência no resultado da hierarquização caso seja alterada o limite dos dados obtidos (região de clima).

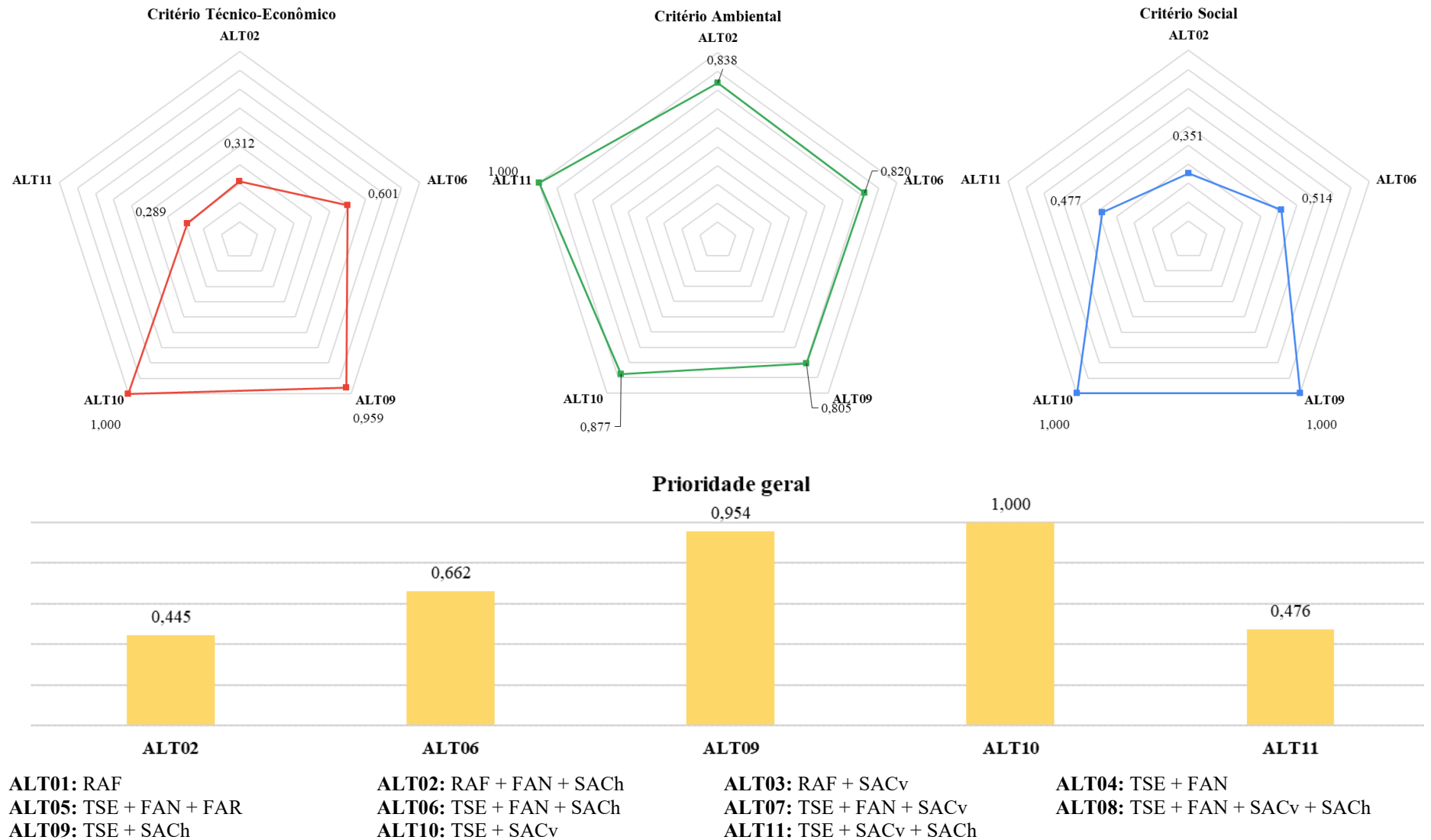
Além da variação de dados, este Cenário também permitiu avaliar a variação das prioridades parciais e gerais, conforme as alternativas consideradas para a análise. Tal alteração ocorrida demonstra o quanto é possível alterar a ordem hierárquica dos sistemas de tratamento conforme os dados e informações adotados na análise.

Tabela 38 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb).

Soluções	Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo – Valores Médios (Cfa + Cfb)							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	-	-	-	-	-	-	-	-
RAF + FAN + SACH	0,0988	0,3123	0,1930	0,8380	0,1049	0,3506	0,1259	0,4453
RAF + SACv	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN + FAR	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN + SACH	0,1901	0,6009	0,1890	0,8204	0,1539	0,5142	0,1871	0,6618
TSE + FAN + SACv	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN + SACv + SACH	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + SACH	0,3033	0,9590	0,1855	0,8054	0,2992	1,0000	0,2697	0,9539
TSE + SACv	0,3163	1,0000	0,2020	0,8771	0,2992	1,0000	0,2827	1,0000
TSE + SACv + SACH	0,0915	0,2893	0,2304	1,0000	0,1428	0,4772	0,1346	0,4760

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 32 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfa + Cfb).



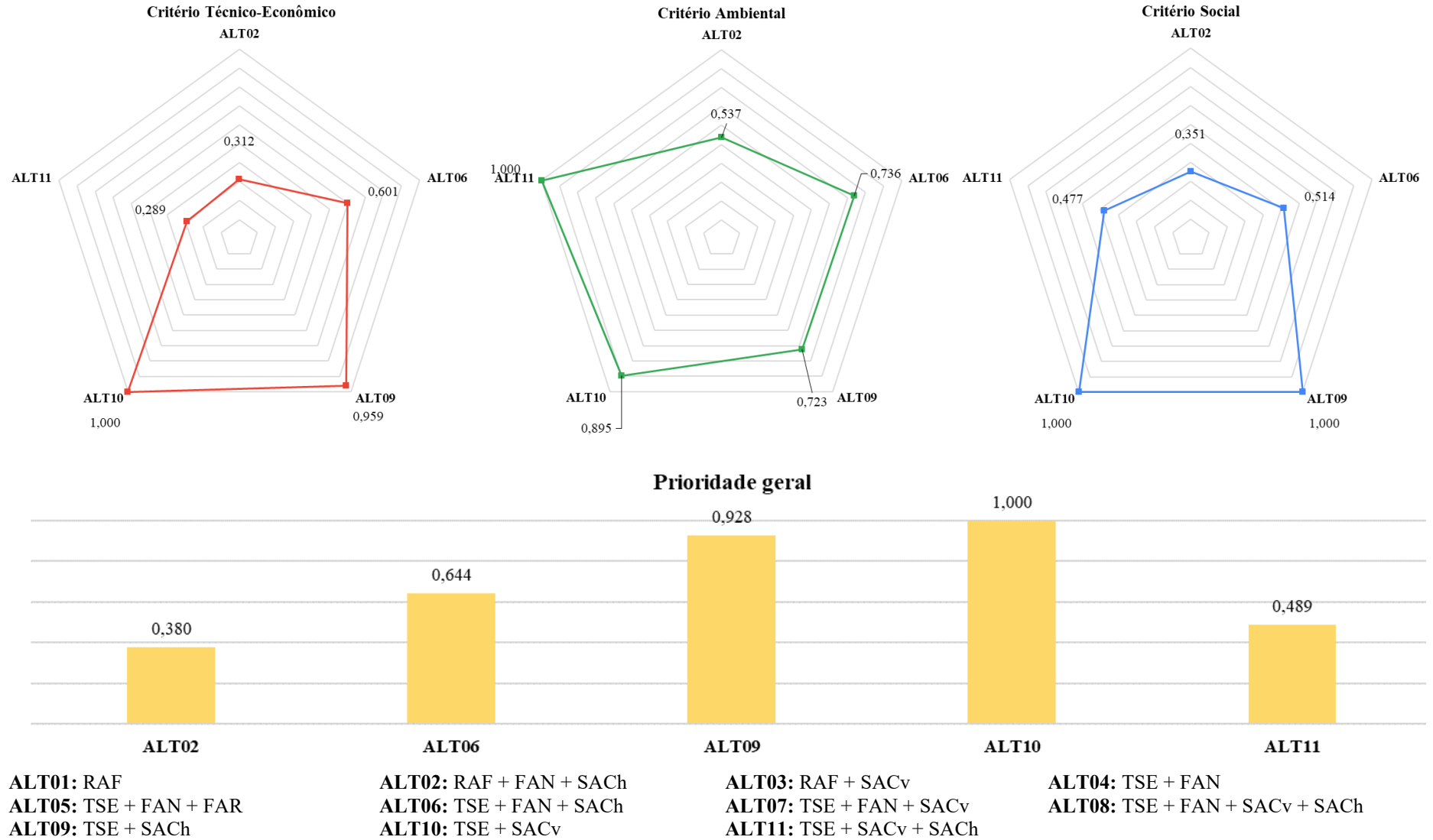
FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 39 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfb).

Soluções	Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo – Valores Médios (Cfb)							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	-	-	-	-	-	-	-	-
RAF + FAN + SACH	0,0988	0,3123	0,1381	0,5371	0,1049	0,3506	0,1103	0,3797
RAF + SACv	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN + FAR	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN + SACH	0,1901	0,6009	0,1892	0,7360	0,1539	0,5142	0,1872	0,6440
TSE + FAN + SACv	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + FAN + SACv + SACH	-	-	-	-	-	-	-	-
TSE + SACH	0,3033	0,9590	0,1857	0,7226	0,2992	1,0000	0,2698	0,9282
TSE + SACv	0,3163	1,0000	0,2300	0,8948	0,2992	1,0000	0,2906	1,0000
TSE + SACv + SACH	0,0915	0,2893	0,2570	1,0000	0,1428	0,4772	0,1421	0,4890

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 33 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade da área de estudo – valores médios (Cfb).



FONTE: Autoria própria (2021).

#### 5.2.4. Resultados da Análise Hierárquica: Cenário de Sensibilidade dos Julgamentos e Pesos

Para os cenários anteriores, o CTE foi o critério com maior peso entre os três (prevaleceu ao CAM e CSO). Então, para a avaliação da sensibilidade dos julgamentos e pesos, os pesos dos critérios foram alterados para o CSO como prioridade, primeiramente, e, em seguida, para o CAM como prioridade. Assim, a Tabela 40 apresenta a matriz de comparação em pares dos critérios, considerando o CSO como prioridade (e o CAM como o segundo prioritário entre os três critérios), e a Tabela 41 apresenta a matriz de comparação em pares considerando o CAM como prioridade (e o CTE como segundo prioritário).

Tabela 40 – Matriz de comparação em pares dos critérios e seus respectivos pesos – com prioridade social.

<b>Crítérios</b>	<b>Técnico-Econômico</b>	<b>Social</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Peso</b>
<b>Técnico-Econômico</b>	1	1/7	1/5	0,07
<b>Social</b>	7	1	3	0,64
<b>Ambiental</b>	5	1/3	1	0,28
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )				3,07
IC ( $IC \sim 0,00$ )				0,03
RC ( $RC \leq 0,10$ )				0,06

FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 41 – Matriz de comparação em pares dos critérios e seus respectivos pesos – com prioridade ambiental.

<b>Crítérios</b>	<b>Técnico-Econômico</b>	<b>Social</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Peso</b>
<b>Técnico-Econômico</b>	1	3	1/5	0,19
<b>Social</b>	1/3	1	1/7	0,08
<b>Ambiental</b>	5	7	1	0,72
Autovalor ( $\lambda_{m\acute{a}x} \sim n$ )				3,07
IC ( $IC \sim 0,00$ )				0,03
RC ( $RC \leq 0,10$ )				0,06

FONTE: Autoria própria (2021).

Assim, a partir dos valores médios utilizados no Cenário Base, e com a alteração dos pesos dos critérios apresentada acima, outras duas rodadas para a avaliação da hierarquia das soluções foram realizadas. A Tabela 42 e a Figura 34 apresentam os resultados obtidos ao considerar o CSO como prioridade, e a Tabela 43 e a Figura 35 apresentam os resultados obtidos ao considerar o CAM como prioridade.

Visto que não foram alterados os pesos dos indicadores e os valores médios utilizados como Cenário Base, sendo então que a prioridade parcial de cada critério se manteve a mesma do Cenário Base, serão discutidas aqui apenas as prioridades gerais – considerando a alteração do peso dos critérios.

Tanto para CSO quanto para CAM como prioridade, é notável que a influência do peso atribuído ao critério altera a hierarquia dos sistemas avaliados. Para CSO como prioridade, TSE + FAN ficou em 1º lugar, RAF em 2º lugar e TSE + SACv em 3º lugar – seguindo conforme as prioridades parciais do CSO.

Para o cálculo da hierarquização com o CAM como prioridade, obteve-se como resultado o sistema RAF + SACv em 1º lugar, TSE + SACv em 2º lugar e TSE + FAN + FAR em 3º lugar. Nesta rodada de cálculo de prioridades, houve uma pequena variação da hierarquia geral com a hierarquia parcial no CAM. Em 2º lugar na hierarquia do CAM está o sistema TSE + SACv + SACH. Contudo, na prioridade geral o sistema TSE + SACv esteve em 2º lugar. Tal feito aconteceu pois, apesar de TSE + SACv não estar dentre os três primeiros sistemas, sua nota na prioridade parcial (normalizada) em CAM é de 0,8325, estando em 4º lugar na hierarquia do CAM (nota ainda alta comparada às demais). Além disso, TSE + SACv está na posição de 3º lugar no CSO e CTE, contribuindo para a sua predominância ao sistema TSE + FAN + FAR, ao ser avaliada a prioridade geral.

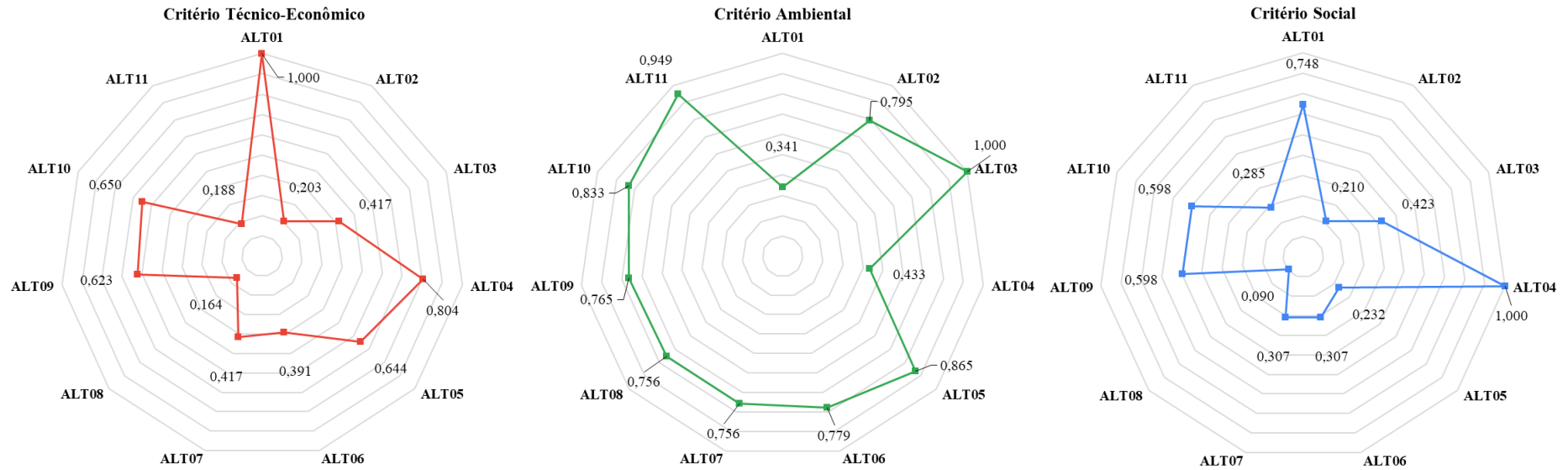
Nota-se pela variação ocorrida neste Cenário, a importância da realização dos julgamentos e cálculo dos pesos quando o método AHP é aplicado para a avaliação de diversas alternativas em diversos critérios e indicadores.

Tabela 42 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade dos julgamentos e pesos – critério social como prioridade.

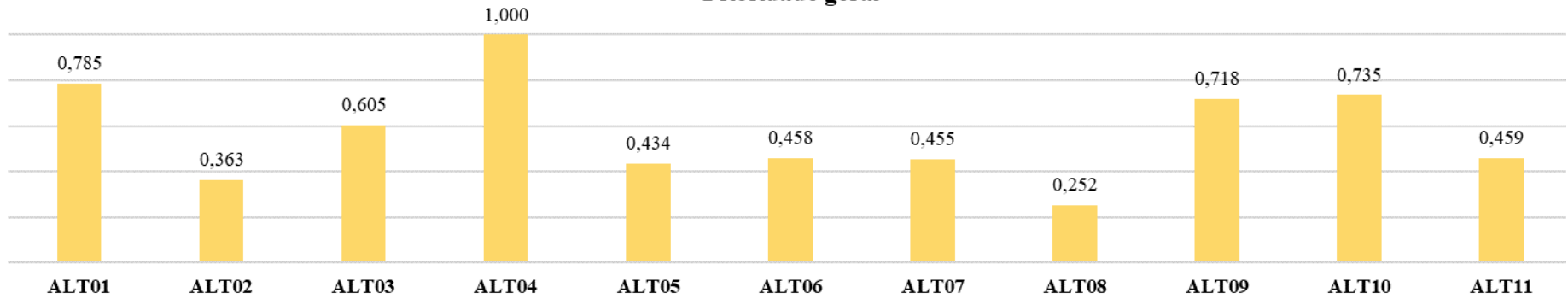
Soluções	Cenário de Sensibilidade dos Julgamentos e Pesos – Critério Social como Prioridade							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,1818	1,0000	0,0413	0,3414	0,1559	0,7480	0,1254	0,7853
RAF + FAN + SACH	0,0369	0,2030	0,0962	0,7954	0,0437	0,2097	0,0580	0,3635
RAF + SACv	0,0759	0,4173	0,1209	1,0000	0,0882	0,4233	0,0965	0,6047
TSE + FAN	0,1461	0,8036	0,0523	0,4330	0,2084	1,0000	0,1596	1,0000
TSE + FAN + FAR	0,1171	0,6440	0,1046	0,8648	0,0483	0,2318	0,0693	0,4340
TSE + FAN + SACH	0,0710	0,3906	0,0941	0,7788	0,0641	0,3074	0,0731	0,4578
TSE + FAN + SACv	0,0759	0,4173	0,0914	0,7559	0,0641	0,3074	0,0727	0,4551
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0297	0,1635	0,0914	0,7559	0,0189	0,0905	0,0402	0,2516
TSE + SACH	0,1133	0,6234	0,0924	0,7646	0,1246	0,5979	0,1147	0,7182
TSE + SACv	0,1182	0,6500	0,1007	0,8325	0,1246	0,5979	0,1173	0,7351
TSE + SACv + SACH	0,0342	0,1881	0,1148	0,9493	0,0595	0,2853	0,0732	0,4587

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 34 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade de julgamentos e pesos – critério social como prioridade.



**Prioridade geral**



**ALT01:** RAF

**ALT05:** TSE + FAN + FAR

**ALT09:** TSE + SACH

**ALT02:** RAF + FAN + SACH

**ALT06:** TSE + FAN + SACH

**ALT10:** TSE + SACv

**ALT03:** RAF + SACv

**ALT07:** TSE + FAN + SACv

**ALT11:** TSE + SACv + SACH

**ALT04:** TSE + FAN

**ALT08:** TSE + FAN + SACv + SACH

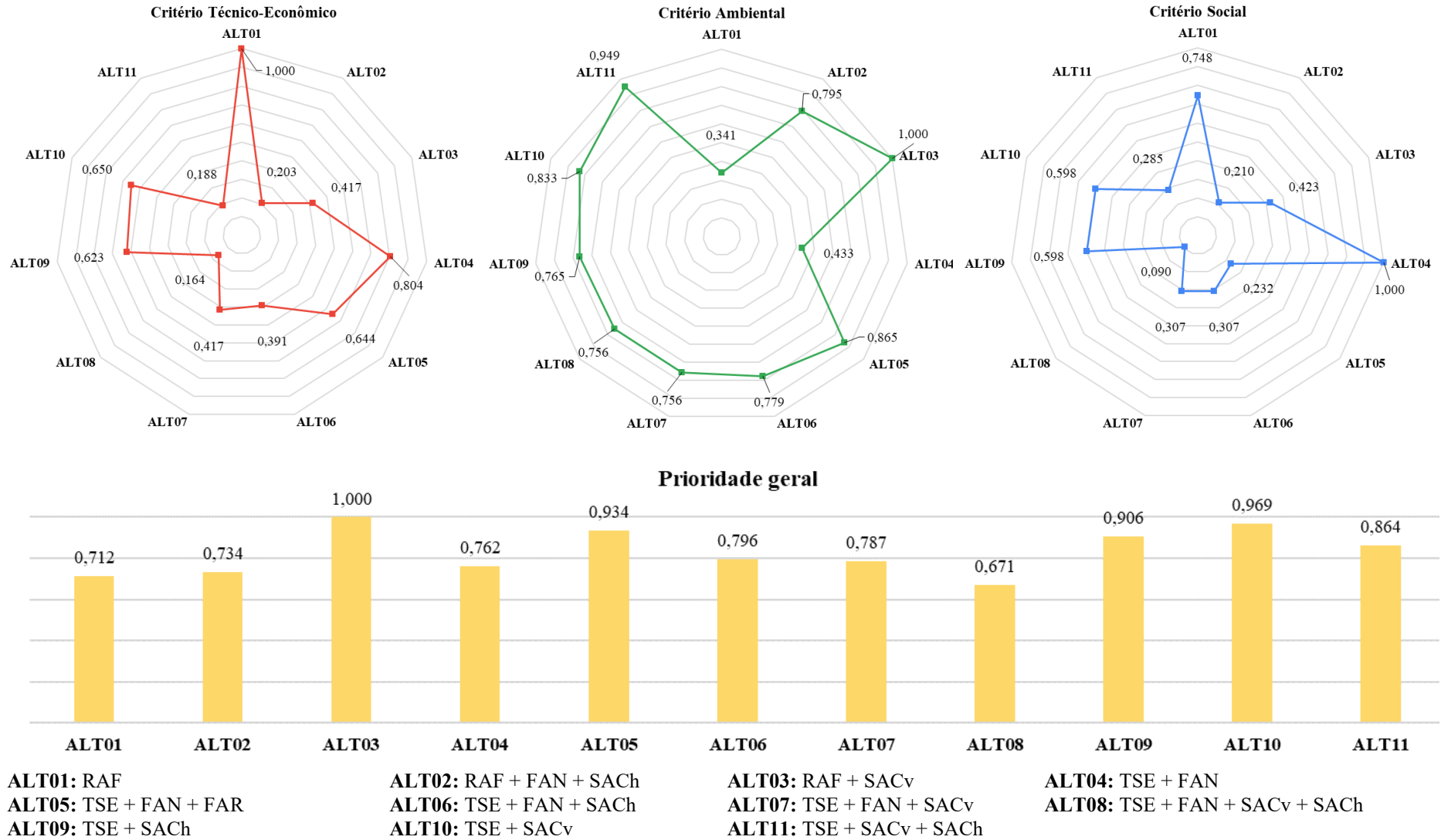
FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 43 – Resultados de priorização da análise hierárquica e dados normalizados referente a avaliação do cenário de sensibilidade de julgamentos e pesos – critério ambiental como prioridade.

Soluções	Cenário de Sensibilidade de Julgamentos e Pesos – Critério Ambiental como Prioridade							
	Critério Técnico-Econômico		Critério Ambiental		Critério Social		Prioridade Geral	
	Prioridade	Prioridade normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada	Prioridade	Prioridade Normalizada
RAF	0,1818	1,0000	0,0413	0,3414	0,1559	0,7480	0,0780	0,7122
RAF + FAN + SACH	0,0369	0,2030	0,0962	0,7954	0,0437	0,2097	0,0803	0,7339
RAF + SACv	0,0759	0,4173	0,1209	1,0000	0,0882	0,4233	0,1095	1,0000
TSE + FAN	0,1461	0,8036	0,0523	0,4330	0,2084	1,0000	0,0835	0,7623
TSE + FAN + FAR	0,1171	0,6440	0,1046	0,8648	0,0483	0,2318	0,1023	0,9343
TSE + FAN + SACH	0,0710	0,3906	0,0941	0,7788	0,0641	0,3074	0,0872	0,7963
TSE + FAN + SACv	0,0759	0,4173	0,0914	0,7559	0,0641	0,3074	0,0861	0,7866
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0297	0,1635	0,0914	0,7559	0,0189	0,0905	0,0734	0,6708
TSE + SACH	0,1133	0,6234	0,0924	0,7646	0,1246	0,5979	0,0991	0,9057
TSE + SACv	0,1182	0,6500	0,1007	0,8325	0,1246	0,5979	0,1060	0,9685
TSE + SACv + SACH	0,0342	0,1881	0,1148	0,9493	0,0595	0,2853	0,0946	0,8640

FONTE: Autoria própria (2021).

Figura 35 – Resultados normalizados da hierarquia proposta no cenário de sensibilidade de julgamentos e pesos – critério ambiental como prioridade.



FONTE: Autoria própria (2021).

### 5.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE HIERÁRQUICA

Para compor a comparação entre os cenários, a Tabela 44 apresenta as prioridades parciais do CTE, a Tabela 45 apresenta as prioridades parciais do CAM, a Tabela 46 apresenta as prioridades parciais do CSO, e a Tabela 47 apresenta as prioridades gerais de cada Cenário. De forma geral, os sistemas que mais estiveram presentes como uma das três prioridades: (i) em relação ao CTE foram RAF, TSE + FAN e TSE + SACv; (ii) em relação ao CAM foram RAF + SACv, TSE + SACv + SACH, e TSE + FAN + FAR; (iii) em relação ao CSO foram TSE + FAN, RAF, TSE + SACv e TSE + SACH; e (iii) em relação à prioridade geral foram RAF, TSE + FAN e TSE + SACv.

As notas e hierarquização alteraram principalmente quando foram alterados os dados de cada alternativa (Cenário de Sensibilidade dos Dados), e os sistemas utilizados para os cálculos de valores médios, conforme região de clima (Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo). Já na prioridade geral, a alteração ocorreu principalmente quanto os pesos de CAM, CTE e CSO foram alterados – assim o *ranking* da prioridade geral seguiu, no geral, conforme a hierarquização do critério com maior peso. Tais observações são necessárias para dar suporte à validação da utilização do método AHP na comparação de sistemas de tratamento de esgoto doméstico descentralizado como alternativas de soluções para áreas rurais e isoladas.

O processo de escolha da alternativa mais viável é complexo e demanda várias análises, dados e informações confiáveis para garantir que a tomada de decisão será realizada de forma adequada. Apesar de ser um processo complexo, a utilização do método AHP torna a escolha da solução de tratamento uma escolha mais confiável – baseada em fatos e dados. Visto as alterações apresentadas na comparação dos Cenários, toma-se como ponto principal a coerência dos dados que serão utilizados na análise.

Os julgamentos realizados também se tornam mais confiáveis quando discutidos em grupo. Parte de um processo de tomada de decisão, discussões em equipe buscam um consenso entre as partes – enquanto um participante acredita ser mais importante a eficiência de remoção de DBO, outro participante acredita ser mais importante a eficiência de remoção de DQO. A busca de opiniões de especialistas para a disposição dos graus de importância entre critérios e indicadores auxilia no cálculo de pesos coerentes para cada indicador e critério.

Estes são os dois principais pontos para que se tenha atenção durante a utilização do método AHP.

Tabela 44 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente ao critério técnico-econômico.

Soluções	Resumo dos Cenários – Critério Técnico-Econômico									
	Cenário Base	Cenário de Sensibilidade dos Dados			Cenário de Sens. da Área de Estudo				Cenário de Sens. dos Julgamentos e Pesos	
	Médio	Máximo	Médio	Mínimo	Cfa + Cfb	Cfa	Cfb + Cfa	Cfb	Critério Ambiental	Critério Social
RAF	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-	-	1,0000	1,0000
RAF + FAN + SACH	0,2030	0,2454	0,2030	0,4544	0,2030	0,2030	0,3123	0,3123	0,2030	0,2030
RAF + SACv	0,4173	-	-	-	0,4173	0,4173	-	-	0,4173	0,4173
TSE + FAN	0,8036	1,0000	0,8036	0,9182	0,8036	0,8036	-	-	0,8036	0,8036
TSE + FAN + FAR	0,6440	0,4686	0,6440	0,8527	0,6440	0,6440	-	-	0,6440	0,6440
TSE + FAN + SACH	0,3906	0,3477	0,3906	0,4741	0,3906	0,3906	0,6009	0,6009	0,3906	0,3906
TSE + FAN + SACv	0,4173	0,3893	0,4173	0,4741	0,4173	0,4173	-	-	0,4173	0,4173
TSE + FAN + SACv + SACH	0,1635	0,1258	0,1635	0,2470	0,1635	0,1635	-	-	0,1635	0,1635
TSE + SACH	0,6234	0,4780	0,6234	0,4741	0,6234	0,6234	0,9590	0,9590	0,6234	0,6234
TSE + SACv	0,6500	0,5196	0,6500	0,4741	0,6500	0,6500	1,0000	1,0000	0,6500	0,6500
TSE + SACv + SACH	0,1881	0,2390	0,1881	0,4331	-	-	0,2893	0,2893	0,1881	0,1881

FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 45 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente ao critério ambiental.

Soluções	Resumo dos Cenários – Critério Ambiental									
	Cenário Base	Cenário de Sensibilidade dos Dados			Cenário de Sensibilidade da Área de Estudo				Cenário de Sens. dos Julgamentos e Pesos	
	Médio	Máximo	Médio	Mínimo	Cfa + Cfb	Cfa	Cfb + Cfa	Cfb	Critério Ambiental	Critério Social
RAF	0,3414	0,3073	0,3597	0,2721	0,3414	0,3414	-	-	0,3414	0,3414
RAF + FAN + SACH	0,7954	0,8380	0,8380	0,5422	0,7954	0,8441	0,8380	0,5371	0,7954	0,7954
RAF + SACv	1,0000	-	-	-	1,0000	1,0000	-	-	1,0000	1,0000
TSE + FAN	0,4330	0,3901	0,4562	0,4616	0,4330	0,4330	-	-	0,4330	0,4330
TSE + FAN + FAR	0,8648	0,9031	0,9110	0,8440	0,8648	0,8648	-	-	0,8648	0,8648
TSE + FAN + SACH	0,7788	0,8186	0,8204	0,8157	0,7788	0,7788	0,8204	0,7360	0,7788	0,7788
TSE + FAN + SACv	0,7559	0,7400	0,7963	0,8258	0,7559	0,7559	-	-	0,7559	0,7559
TSE + FAN + SACv + SACH	0,7559	0,7400	0,7963	0,8370	0,7559	0,7559	-	-	0,7559	0,7559
TSE + SACH	0,7646	0,7554	0,8054	0,8510	0,7646	0,7788	0,8054	0,7226	0,7646	0,7646
TSE + SACv	0,8325	0,8766	0,8771	0,8964	0,8325	0,8325	0,8771	0,8948	0,8325	0,8325
TSE + SACv + SACH	0,9493	1,0000	1,0000	1,0000	-	-	1,0000	1,0000	0,9493	0,9493

FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 46 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente ao critério social.

Soluções	Resumo dos Cenários – Critério Social									
	Cenário Base	Cenário de Sensibilidade dos Dados			Cenário de Sens. da Área de Estudo				Cenário de Sens. dos Julgamentos e Pesos	
	Médio	Máximo	Médio	Mínimo	Cfa + Cfb	Cfa	Cfb + Cfa	Cfb	Critério Ambiental	Critério Social
RAF	0,7480	1,0000	0,7480	0,7517	0,7480	0,7480	-	-	0,7480	0,7480
RAF + FAN + SACH	0,2097	0,3275	0,2097	0,2096	0,2097	0,2097	0,3506	0,3506	0,2097	0,2097
RAF + SACv	0,4233	-	-	-	0,4233	0,4233	-	-	0,4233	0,4233
TSE + FAN	1,0000	0,8897	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-	-	1,0000	1,0000
TSE + FAN + FAR	0,2318	0,3580	0,2318	0,2279	0,2318	0,2318	-	-	0,2318	0,2318
TSE + FAN + SACH	0,3074	0,4625	0,3074	0,2907	0,3074	0,3074	0,5142	0,5142	0,3074	0,3074
TSE + FAN + SACv	0,3074	0,4625	0,3074	0,2907	0,3074	0,3074	-	-	0,3074	0,3074
TSE + FAN + SACv + SACH	0,0905	0,1300	0,0905	0,1751	0,0905	0,0905	-	-	0,0905	0,0905
TSE + SACH	0,5979	0,8897	0,5979	0,5948	0,5979	0,5979	1,0000	1,0000	0,5979	0,5979
TSE + SACv	0,5979	0,8897	0,5979	0,5948	0,5979	0,5979	1,0000	1,0000	0,5979	0,5979
TSE + SACv + SACH	0,2853	0,4320	0,2853	0,2723	-	-	0,4772	0,4772	0,2853	0,2853

FONTE: Autoria própria (2021).

Tabela 47 – Resumo dos resultados dos cenários elaborados, referente a prioridade geral.

Soluções	Resumo dos Cenários – Prioridade Geral									
	Cenário Base	Cenário de Sensibilidade dos Dados			Cenário de Sens. da Área de Estudo				Cenário de Sens. dos Julgamentos e Pesos	
	Médio	Máximo	Médio	Mínimo	Cfa + Cfb	Cfa	Cfb + Cfa	Cfb	Critério Ambiental	Critério Social
RAF	1,0000	0,9889	1,0000	0,9826	1,0000	1,0000	-	-	0,7122	0,7853
RAF + FAN + SACH	0,3866	0,4332	0,3947	0,5485	0,4009	0,4122	0,4453	0,3797	0,7339	0,3635
RAF + SACv	0,6388	-	-	-	0,6558	0,6541	-	-	1,0000	0,6047
TSE + FAN	0,8860	1,0000	0,8882	1,0000	0,8899	0,8896	-	-	0,7623	1,0000
TSE + FAN + FAR	0,7739	0,6368	0,7809	0,9600	0,7861	0,7848	-	-	0,9343	0,4340
TSE + FAN + SACH	0,5498	0,5238	0,5570	0,6517	0,5625	0,5612	0,6618	0,6440	0,7963	0,4578
TSE + FAN + SACv	0,5665	0,5397	0,5733	0,6545	0,5785	0,5773	-	-	0,7866	0,4551
TSE + FAN + SACv + SACH	0,3309	0,2931	0,3386	0,4588	0,3445	0,3431	-	-	0,6708	0,2516
TSE + SACH	0,7724	0,6513	0,7787	0,6990	0,7835	0,7861	0,9539	0,9282	0,9057	0,7182
TSE + SACv	0,8113	0,7152	0,8182	0,7118	0,8235	0,8222	1,0000	1,0000	0,9685	0,7351
TSE + SACv + SACH	0,4199	0,4740	0,4299	0,6681	-	-	0,4760	0,4890	0,8640	0,4587

FONTE: Autoria própria (2021).

## 6. CONCLUSÃO

Sendo o planejamento dos sistemas de coleta e tratamento do esgoto doméstico em áreas rurais brasileiras uma tarefa complexa, em frente às grandes variações demográficas e climáticas que o País possui, neste estudo, buscou-se classificar tais sistemas de forma hierárquica para avaliar a viabilidade técnica-econômica, social e ambiental dos sistemas mais indicados em determinadas condições.

Para esta avaliação, estudos de caso e projetos piloto foram levantados dentro do recorte da área de estudo (regiões de clima subtropical úmido onde não há estação de seca, representada pela sigla Cf na classificação climática de Köppen) para a busca de informações dos tipos de sistemas possíveis de serem utilizados de forma descentralizada na região citada. A avaliação dos sistemas e tomada de decisão sobre qual é a melhor configuração de tratamento de esgoto doméstico (e mais sustentável) foi realizada a partir da metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP) – processo de análise hierárquica. A sustentabilidade de cada tratamento foi avaliada conforme indicadores técnico-econômicos, social e ambiental – contemplando as três frentes da sustentabilidade.

A partir do levantamento de dados, pretendeu-se avaliar 11 diferentes configurações de tratamento de esgoto doméstico possíveis de serem implantados em domicílios rurais brasileiros. Assim, dados ambientais (eficiência na remoção da matéria orgânica, coliformes, sólidos e nutrientes), técnico-econômicos (área utilizada, manutenção e custo) e sociais (simplicidade, odores e proliferação de insetos e vermes) foram atribuídos à cada sistema para a avaliação de forma hierárquica – utilizando de metodologias para otimizar a tomada de decisão pelo julgamento de dados qualitativos e quantitativos em conjunto, e indicação dos melhores sistemas.

Fazem parte da configuração das alternativas de tratamento de esgoto doméstico, de forma descentralizada, a digestão anaeróbia (TSE e RAF), os alagados construídos (SACv e SACH), e filtros (FAN e FAR). Dentre as 11 configurações dos sistemas avaliados a partir do método AHP, para a região de clima Cf, os mais presentes nas três prioridades de cada critério separadamente (CTE, CSO e CAM) e de prioridade geral (avaliando os critérios em conjunto) foram RAF, TSE + FAN e TSE + SACv. São sistemas que, na análise hierárquica, apresentam no geral baixo custo, baixa frequência de manutenção, simplicidade alta/moderada, alta eficiência na remoção de matéria orgânica, nutrientes, coliformes e sólidos, e moderada proliferação de insetos e vermes e geração de odores.

A realização de diferentes Cenários fez com que as notas de cada prioridade se alterassem e, inclusive, a própria hierarquização de prioridades parciais e prioridade geral fosse alterada do Cenário Base. Com isto, apesar de ser um método útil de aplicação, sua sensibilidade aos dados utilizados e julgamentos aplicados é moderada. Desta forma, a utilização do método AHP é sugerida quando há uma diversidade de dados disponíveis para o cálculo (dados de aplicações dos sistemas em escala real, principalmente), e quando há auxílio de especialistas e opinião pública para a definição dos julgamentos realizados. Evitando divergências de resultados pela falta de dados e julgamentos incoerentes, o método AHP é fácil de utilizar e demonstra ser uma ótima opção de metodologia para aplicar a tomadas de decisão na escolha da implementação de sistemas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais.

No contexto da utilização do estudo de viabilidade apresentado, tem-se a oportunidade de planejamento e implementação de soluções econômicas de tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais brasileiras, e que atendam aos parâmetros sociais e ambientais definidos na análise. Este estudo demonstra a possibilidade de maiores avanços em planejamento rural definindo – dentre tantos tipos de sistemas, configurações e variáveis – qual é a melhor escolha em determinada realidade (conforme o contexto no qual será aplicada). Parte do planejamento, a utilização do estudo de viabilidade apresentado condiz com os três eixos estratégicos apresentados pelo PNSR: (i) sendo parte metodológica de gestão dos serviços; (ii) permitindo a utilização de soluções tecnológicas viáveis para a realidade local; e (iii) partindo da gestão conjunta com os titulares de serviço (em âmbito local/municipal) para garantir a participação social, educação e auxílio na operação e manutenção dos sistemas.

Tal formulação de tomada de decisão contribui às estratégias de universalização do saneamento rural, auxiliando Poder Público e entidades na escolha dos melhores sistemas alternativos de tratamento de esgoto doméstico, otimizando recursos e possibilitando melhores condições sanitárias à população.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969** – Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final de efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ALTVATER, P. K. **Avaliação do desempenho de um tanque séptico modificado e tratamento complementar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

ALVARENGA, A. de L. Saneamento Rural no Brasil – Desafio da universalização do esgotamento sanitário e a busca de soluções para o tratamento do esgoto em comunidades rurais e tradicionais. Estudo sobre experiências exitosas utilizando tecnologias sustentáveis e arcabouço jurídico para sua implementação. *In*: MIRANDA, J., MARQUES, R. C., SAMPAIO, P., SAMPAIO, R. (org.). **Estudos de Direito do Saneamento**. Lisboa: ICJP, CIDP, 2020, p. 51-92.

ALVAREZ, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANAGNOSTOPOULOS, K., VAVATSIKOS, A. Site Suitability Analysis for Natural Systems for Wastewater Treatment with Spatial Fuzzy Analytic Hierarchy Process. **Journal of Water Resources Planning and Management**, p. 125-134, 2012.

BARROSO, L. R. Saneamento básico: competências constitucionais da União, Estados e Municípios. **Revista de Informação Legislativa**. Brasília, a. 38, n. 153, jan./mar. 2002.

BORZA, S., PETRESCU, V. The Olt River pollution monitoring, using spacial analisys, analitic hierarchy process and technique for order preference by similarity methods. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 101, p. 9-18, 2016.

BOTTERO, M., COMINO, E., RIGGIO, V. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, p. 1211-1224, 2011.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF, 05 out. 1988.

BRASIL. **Decreto Federal nº 7.217 de 21 de junho de 2010**. Regulamenta a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. Brasília, DF, publicado no D.O.U 22 jun. 2010.

BRASIL. **Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, DF, 08 jan. 2007.

BRASIL. **Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Brasília, DF, publicado no D.O.U. 16 jul. 2020.

CAMPOLINA, A. G., DE SOÁREZ, P. C., DO AMARAL, F. V., ABE, J. M. Análise de decisão multicritério para alocação de recursos e avaliação de tecnologias em saúde: tão longe e tão perto?. **Caderno de Saúde Pública**, v. 33, n. 10, p. 1-15, 2017.

CARVALHO, F. M., CAMPOS, J. C., MANNARINO, C. F. *Wetland* no pós-tratamento de esgoto sanitário. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro: ABES, 2015.

CEVE, A. **Avaliação de *wetland* construído de fluxo subsuperficial horizontal para tratamento de esgotos sanitários**. Tratamento de conclusão de curso (Graduação em Tecnologia em Processos Ambientais) – Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnologia Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CHATZIMOURATIDIS, A. I., PILAVACHI, P. A. Sensitivity analysis of technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the analytic hierarchy process. **Energy Policy**, v. 37, p. 788-798, 2009.

CHAVES, V. T., TOMAZ, F. A., CONTRERA, R. C. Avaliação do desempenho de uma tecnologia apropriada para o saneamento rural. **Revista DAE**, v. 67, n. 220, p. 173-187, 2019.

CHEN, H., XIAO, F., BI, Z., XIAO, P., WANG, D., YANG, M. Practical evaluation for water utilities in China by using analytic hierarchy process. **Front. Environ. Sci. Eng.**, v. 9, n. 1, p. 131-137, 2015.

CHEN, S., MU, W. YANG, L. Application of the Analytic Hierarchy Process for the selection of wastewater reuse targets. **Management Decision**, v. 52, n. 7, p. 1222-1235, 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 430/2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357/2005. Brasília, DF, publicado no D.O.U 16 mai. 2011.

COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica**. Niterói, RJ: UFF, H. G. Costa, 2002.

CRUZ, L. M. O. **Tratamento de esgoto sanitário em reator anaeróbio preenchido por casca de coco verde (*Cocos nucifera*) combinado com filtro de areia**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

DELGADO-GALVAN, X., PÉREZ-GARCÍA, R., IZQUIERDO, J., MORA-RODRÍGUEZ, J. An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. **Mathematical Computer Modelling**, v. 52, p. 1194-1202, 2010.

DOMINATO, D. T. **Tratamento de efluente anaeróbio: condicionamento em filtro de areia visando lançamento e reuso**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

DOTRO, G., LANGERGRABER, G., MOLLE, P., NIVALA, J., PUIGAGUT, J., STAIN, O., VON SPERLING, M. **Treatment wetlands – volume 7**. London: IWA Publishing, 2017. 155 p.

DUSAK, V., DMITROVIC, L. G., BAGNALL, R. Using AHP Method for Making a Decision on How the Management of Sewage Sludge in the Northern Croatia. **JIOS**, v. 41, n.2, p. 161-170, 2017.

FIGUEIREDO, I. C. S. **Tratamento de esgoto na zona rural: diagnóstico participativo e aplicação de tecnologias alternativas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

FRANCESCHINI, G. **Tecnologias de baixo custo para tratamento de esgoto rural: reator UASB e fossa séptica econômica**. 2019. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2019.

FRANCISCO, C. E. da S., COELHO, R. M., TORRES, R. B., ADAMI, S. F., Espacialização de análise multicriterial em SIG: prioridades para recuperação de Áreas de Preservação Permanente. *In*: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais [...]**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 2643-2650.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **CataloSan: Catálogo de Soluções Sustentáveis de Saneamento – Gestão de efluentes domésticos**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde – Campo Grande, UFMS, 2018.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento**. 2019a. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/web/guest/biblioteca-eletronica/publicacoes/engenharia-de-saude-publica>>. Acesso em: 05 nov. 2020.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Programa Nacional de Saneamento Rural**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. 2019b.

GOMES, B. G. L. A. **Tratamento de esgoto de pequena comunidade utilizando tanque séptico, filtro anaeróbio e filtro de areia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

HOSOI, C. Comunidades isoladas exigem um saneamento sob medida. **Revista DAE**. São Paulo, n. 187, p. 4-12, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas de Saneamento**. 2011a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/atlas/tematicos/16365-atlas-de-saneamento.html?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 06 abr. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base de Informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário**. Rio de Janeiro, 2011b. Disponível em: <[https://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/base\\_de\\_informacoess\\_por\\_setor\\_censitario\\_universo\\_censo\\_2010.pdf](https://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/base_de_informacoess_por_setor_censitario_universo_censo_2010.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=9665&t=downloads>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

JAVAREZ JUNIOR, A., PAULA JUNIOR, D. R., GAZZOLA, J. Avaliação do desempenho de dois sistemas modulares no tratamento anaeróbio de esgotos em comunidades rurais. **Eng. Agríc.**, v. 27, n. 3, p. 794-803, 2007.

KAYA, I. Multicriteria Location Selection of Wastewater Treatment Plant by Fuzzy Analytic Hierarchy Process. **J. of Mult.-Valued Logic & Soft Computing**, v. 17, p. 305-320, 2011.

KELLNER, E., CALIJURI, M. C., PIRES, E. C. Aplicação de Indicadores de sustentabilidade para lagoas de estabilização. **Eng Sanit Ambient**, v. 14, n. 4, p. 455-464, 2009.

KOHLER, A., ZERWES, F. V., KIST, L. T., SCHNEIDER, R. C. S., MACHADO, E. L. Sistema integrado UASB/*wetlands*/UV aplicado ao tratamento e reuso de águas residuárias de propriedade rural. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro: ABES, 2015.

KURKA, T. Application of the analytic hierarchy process to evaluate the regional sustainability of bioenergy developments. **Energy**, v. 62, p. 393-402, 2013.

LI, Y., LIN, C., WANG, Y., GAO, X., XIE, T., HAI, R., WANG, X., ZHANG, X. Multi-criteria evaluation method for site selection of industrial wastewater discharge in coastal regions. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 1143-1151, 2017.

LIMA, G. S., NUNES, A. B. A., MAGALHÃES, A. M. C., CAMPOS, V. R. Aplicação de metodologia de análise hierárquica (AHP) para priorização de intervenção em estações de tratamento de esgotos – Estudo de caso na Bacia do Siqueira, Fortaleza/CE. **Revista DAE**, v. 68, n. 225, p. 34-50, 2020.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

- MADRID, F. J. P. L. **Aplicação de vermifiltro no tratamento de esgoto sanitário**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- MADRID, F. J. P. L., SCHNEIDER, J., MARQUES, M. M. S., PARIZOTTO, M. C., FIGUEIREDO, I. C. S., TONETTI, A. L. Vermifiltração: o uso de minhocas como nova alternativa para o tratamento de esgoto. **Revista DAE**, v. 67, n. 220, p. 128-140, 2019.
- MARCHESI, M. D. T. **Remoção de matéria orgânica, nutrientes e antibióticos em esgotos domésticos por wetlands construídas de fluxo vertical**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2020.
- MASSEI, G., ROCCHI, L., PAOLOTTI, L., GRECO, S., BOGGIA, A. Decision Support Systems for environmental management: A case study on wastewater from agriculture. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 491-504, 2014.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Plano Nacional do Saneamento Básico**. 2013. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>>. Acesso em: 21 jul. 2019.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Resolução Recomendada nº 75 de 02 de julho de 2009**. Estabelece orientações relativas à Política de Saneamento Básico e ao conteúdo mínimo dos Planos de Saneamento Básico. 2009.
- MELLO, D. **Comparativo da eficiência de tratamento de esgoto sanitário bruto e pós-reator UASB, em sistema piloto de wetland construído com *Pontederia Parviflora* Alexander**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Bacharel em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2013.
- MELO, S. Saneamento rural: desafio que exige novas soluções. **Revista DAE**. São Paulo, v. 67, n. 220, p. 6-14, 2019.
- METCALF & EDDY, INC. TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F. L., STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering – Treatment and Reuse**. 4ª edição. McGraw-Hill Companies, Inc. 2003, 1878 p.
- MOLINOS-SENANTE, M., GOMEZ, T., GARRIDO-BESARBA, M., CABALLERO, R., SALA-GARRIDO, R. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. **Science of the Total Environment**., v. 497-498, p. 607-617, 2014.
- MONTEIRO, V. R. C., SEZERINO, P. H., SUNTTI, C., SCARATTI, D., PHILIPPI, L. S. Sistema híbrido de wetlands construídos para tratamento de efluente de tanque séptico. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro: ABES, 2015.
- MORAIS, C. J. **Avaliação de wetland construído de fluxo subsuperficial vertical tratando esgotos sanitários**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em

Processos Ambientais) – Departamento de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MOTA, B. O. **Alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes domésticos em zonas rurais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

NAVA, L., LIMA, C. Avaliação da eficiência da estação de tratamento de esgoto por zona de raízes (ETEZR) instalada no Horto Florestal de Caçador-SC. **Ignis**, v. 1, n. 1, 2012.

NOKES, C., GRANTHAM-MCGREGOR, S. M., SAWYER, A. W., COOPER, E. S., ROBINSON, B. A., BUNDY, D. A. Moderate to heavy infections of *Trichuris trichiura* affect cognitive function in Jamaican school children. **Parasitology**, v. 104, n. 3, p. 539-547, 1992.

NUNES, A. S. **Wetlands construídos empregados para remoção de fósforo de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2020.

OLIVEIRA, J. L. R., HENN, A., WEBER, S. B., PANCERI, B. Sistemas de tratamento de esgoto doméstico na comunidade rural de Caeté, microbacia do rio São Bento, Gravatal-SC. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 28., Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro: ABES, 2015.

OUYANG, X., GUO, F., SHAN, D., YU, H., WANG, J. Development of the integrated fuzzy analytical hierarchy process with multidimensional scaling in selection of natural wastewater treatment alternatives. **Ecological Engineering**, v. 74, p. 438-447, 2015.

PAGLIARINI JUNIOR, S. N., PAROLIN, M., CRISPIM, J. Q. Estações de tratamento de esgoto por zona de raízes, uma alternativa viável para as cidades? **Rev. GEOMAE**, v. 2, n.1, 2011.

PAROLIN, M., CRISPIM, J. Q., KAICK, T. S. V. Tratamento de esgoto por zona de raízes: análise e eficiência. **Rev. GEOMAE**, v. 3, n. 1, p. 45-57, 2012.

PAULA, A. G. P., BAETTKER, E. C., CARVALHO, K. Q., FREIRE, F. B., PASSIG, F. H. Avaliação de comportamento de filtros anaeróbios preenchidos com carvão ativado, cerâmica de argila e borracha de pneu. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 28., Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro: ABES, 2015.

PAVANI, I. D., CICERELLI, R. E., ALMEIDA, T., MOURA, L. Z., CONTRERAS, F. Allocation of sanitary landfill in consortium: strategy for the Brazilian municipalities in the State of Amazonas. **Environ Monit Assess**, v. 191, n. 39, p. 1-13, 2019.

PEREIRA, A. C., MARAGON, B. B., SANTOS, T. C. C., REZENDE, A. A. P. Definição de critérios para escolha de alternativas de sistemas individuais de esgotamento sanitário. *In: CONGRESSO ABES*, 30., 2019. Natal. **Anais [...]**. Natal: ABES, 2019.

PHILIPPI, L. S., SEZERINO, P. H., PANCERI, B., OLIJNYK, D. P., KOSSATZ, B. Root zone system to treat wastewater in rural areas in south of Brazil. 2006.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Relatório do Desenvolvimento Humano**. 2019. Disponível em:

<[http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr\\_2019\\_pt.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2019_pt.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2021.

POSTIGO, M. D., BRESSANE, A., FRANCESCHINI, G., CHAVES, M. R. M., LONGO, R. M. Avaliação da eficiência de fossa séptica de baixo custo desenvolvida para o saneamento rural. **Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal**, v. 14, n. 1, p. 26-35, 2017.

RIBEIRO, A. S., MINCATO, R. L., CURI, N., KAWAKUBO, F. S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 16-31, 2016.

RODRIGUES, E. B., LAPOLLI, F. R., SANTOS, M. A. A. Tratamento de esgoto por zona de raízes: experiência vivenciada numa escola rural do município de Campos Novos/SC. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 5, n. 2, p. 47-55, 2015.

ROLAND, N., TRIBST, C. C. L., SENNA, D. A., SANTOS, M. R. R., REZENDE, S. A. ruralidade como condicionante da adoção de soluções de saneamento básico. **Revista DAE**. São Paulo, v. 67, n. 220, p. 6-14, 2019.

ROSA, A., BIZETTO, D. C., SVENAR, S., SCHIMALESKI, A. P. C., PEDRO, B. L. A contribuição de sistemas de tratamento de esgoto por zonas de raízes para gestão de recursos hídricos na região metropolitana de Curitiba. **Braz. J. of Develop.**, v. 6, n. 4, p. 17794-17805, 2020.

ROSEN, G. **Uma história da saúde pública**. São Paulo, SP: Hucitec, 1994. 423 p.

ROTHMUND, K., BECKER JUNIOR, A. M. Avaliação da viabilidade e proposta de tratamento de efluente doméstico em universidades através de um vermifiltro com minhocas da espécie *Eisenia andrei*. In: Simpósio Internacional da Qualidade Ambiental, 11., Porto Alegre, **Anais...**, Porto Alegre, 2018.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, p. 234-281, 1977.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. **Mathl Modeling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **Int. J. Services Sciences**, v. 1, n. 1, 2008.

SANCHES, A. B. **Avaliação da sustentabilidade de sistemas de tratamento de esgotos sanitários: uma proposta metodológica**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, A. B. dos (org.). **Caracterização, tratamento e gerenciamento de subprodutos de correntes de esgotos segregadas e não segregadas em empreendimentos habitacionais**. Fortaleza: Imprece, 2019.

SANTOS, P. H., NEVES, S. M., SANT'ANNA, D. O., OLIVEIRA, C. H., CARVALHO, H. D. The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 119-138, 2019.

SAWYER, C. N., MCCARTY, P. L., PARKIN, G. F. **Chemistry for Environmental Engineering and Science**. New York: McGraw Hill Education, 5. ed., 2003.

SCHIRMER, W. N., MACHADO, G. O., STUMPF, G., LEMES, J. L. V. B., AGASSI, J. D., VAN KAICK, T. Tratamento de esgoto por zona de raízes em comunidade rural – parte 2: avaliação. **Rev. Acad. Ciênc. Agrár. Ambient.**, v. 7 n. 2, p. 165-173, 2009.

SCRIPTORE, J. S., AZZONI, C. R., FILHO, N. A. M. Saneamento básico e indicadores educacionais no Brasil. **Departament of Economics, FEA-USP, Working Paper Series n° 28**, 2015.

SECCHI, F. J., KONRAD, O., TONETTO, J. Avaliação do balanço hídrico e da eficiência de um alagado construído como alternativa de tratamento para efluente doméstico. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, p. 453-461, 2016.

SEZERINO, P. H., SANTOS, M. O., PELISSARI, C., CELIS, G. S., PHILIPPI, L. S. *Wetlands* construídos horizontais aplicados no tratamento descentralizados de esgotos. **R. Eng. Constr. Civ.**, v. 2, n. 2, p. 1-10, 2015.

SILVA, F. J. A., SOUZA, R. O. Seleção de política de controle da água com análise hierárquica de processo. **Rev. Tecnológica Fortaleza**, v. 20, n. 1, p. 16-26, 2008.

SILVA, R. **Avaliação da eficiência no tratamento de esgoto sanitário proveniente de tanques sépticos**. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

SILVEIRA, D. F., ARSEGO, N. R. **Avaliação da eficiência do tratamento de esgoto por estação de zona de raízes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2014.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Meteorologia e climatologia florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015. 215 p.

SUN, Y., GARRIDO-BASERDA, M., MOLINOS-SENANTE, M., DONIKIAN, N. A., POCH, M., ROSSO, D. A composite indicator approach to assess the sustainability and resilience of wastewater management alternatives. **Science of the Total Environment**, v. 725, p. 1-15, 2020.

TABOADA-GONZALEZ, P., AGUILAR-VIRGEN, Q., OJEDA-BENÍTEZ, S., CRUZ-SOTELO, S. Application of analytic hierarchy process in a waste treatment technology assessment in Mexico. **Environ Monit Assess**, v. 186, p. 5777-5795, 2014.

TESKE, F. F., WARTCHOW, D. Implantação de um *wetland* construído híbrido para polimento de efluente doméstico. *In: Congresso ABES FENASAN, Anais...*, São Paulo, 2017.

THOKALA, P., DUENAS, A. Multiple Criteria Decision Analysis for Health Technology Assessment. **Value in Health**, v. 5, p. 1172-1181, 2012.

TIAN, W., BAI, J., SUN, H., ZHAO, Y. Application of the analytic hierarchy process to a sustainability assessment of coastal beach exploitation: A case study of the wind power projects on the coastal beaches of Yancheng, China. **Journal of Environmental Management**, v. 115, p. 251-256, 2013.

TILLEY, E., LUKAS, U., LUTHI, C., REYMOND, P., ZURBRUGG, C. **Compendium of Sanitation Systems and Technologies**. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 2014, 180 p.

TONETTI, A. L., BRASIL, A. L., MADRID, F. J. P. L., FIGUEIREDO, I. C. S., SCHNEIDER, J., CRUZ, L. M. O., DUARTE, N. C., FERNANDES, P. M., COASACA, R. L., GARCIA, R. S., MAGALHÃES, T. M. **Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas - referencial para a escolha de soluções**. Campinas, SP: Unicamp, 2018, 153 p.

TONON, D., TONETTI, A. L. CORAUCCI FILHO, B., BUENO, D. A. C. Wastewater treatment by anaerobic filter and sand filter: Hydraulic loading rates for removing organic matter, phosphorus, pathogens and nitrogen in tropical countries. **Ecological Engineering**, v. 82, p. 583-589, 2015.

TREIN, C. M., PELISSARI, C., HOFFMANN, H., PLATZER, C. J., SEZERINO, P. H. Desempenho de um *wetland* construído vertical operando sob alta carga orgânica aplicada. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28., Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro: ABES, 2015a.

TREIN, C. M., PELISSARI, C., HOFFMANN, H., PLATZER, C. J., SEZERINO, P. H. Tratamento descentralizado de esgotos de empreendimentos comercial e residencial empregado a ecotecnologia dos *wetlands* construídos. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 351-367, 2015b.

VASILJEVIC', T. Z., SRDJEVIC', Z., BAIC'ETIC, R., MILORADOV, M. V. GIS and the Analytic Hierarchy Process for Regional Landfill Site Selection in Transitional Countries: A Case Study From Serbia. **Environmental Management**, v. 49, p. 445-458, 2012.

VEISI, H., LIAGHATI, H., ALIPOUR, A. Developing an ethics-based approach to indicators of sustainable agriculture using analytic hierarchy process (AHP). **Ecological Indicators**, v. 60, p. 644-654, 2016.

VELASQUEZ, M., HESTER, P. T. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. **International Journal of Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 56-66, 2013.

VESILIND, P. A., MORGAN, S. M. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2011, 438 p. ISBN 978-85-221-0718-6.

VOROBIEV, P., HOLOWNIA, M., KRASNOVA, L. Multi-criteria decision analysis (MCDA) and its alternatives in health technology assessment. **Journal of Health Policy & Outcomes Research**, v. 1, p. 34-43, 2015.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos – Volume 1.** 4ª edição. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2014, 472 p., ISBN: 978-85-423-0053-6.

VON SPERLING, M. **Lagoas de Estabilização – Volume 3.** 3ª edição. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2017, 196 p., ISBN: 978-85-423-0182-3.

WEI, C. WEI, J., KONG, Q., FAN, D., QIU, G., FENG, C., LI, F., PREIS, S., WEI, C. Selection of optimum biological treatment for coking wastewater using analytic hierarchy process. **Science of the Total Environment**, v. 742, p. 1-12, 2020.

ZANIN, R. A. **Seleção de processos de tratamento de esgoto sanitário utilizando análise multicritério.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2011.

ZERWES, F. V. **Sistema de tratamento e reuso de águas residuárias em pequenas propriedades rurais: acompanhamento e operação de estação no Vale do Rio Pardo – RS.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental), Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2013.

## APÊNDICE A – DADOS DESMEMBRADOS DE CADA REFERÊNCIA UTILIZADA NO ESTUDO

Estão apresentados neste Apêndice todos os estudos que foram analisados para a atribuição de dados quantitativos dos indicadores ambientais deste estudo.

Para cada referência (projetos pilotos de pesquisa e/ou estudos de caso) encontrada na busca de dados para serem utilizados na análise hierárquica, eram anotados o tipo de sistema e o município em que foi instalado/projetado. Em seguida, o município era classificado conforme proposto por Alvarez *et al.* (2013).

Assim, os estudos foram agrupados por configuração do sistema de tratamento encontrado, sendo possível utilizar diversos dados para cada configuração de tratamento (em sua maioria). Após a organização dos dados coletados, a média e desvio padrão foram calculados para cada tipo de sistema. Conforme descrito no Capítulo 4, os dados foram trabalhados conforme diferenciado por cores na Tabela 48:

- a) **Em preto:** informações diretamente da referência citada, sem considerar o desvio padrão calculado no estudo de referência (considerou-se apenas as médias);
- b) **Em laranja:** pela falta de informações de alguns tipos de tratamento de esgoto, optou-se por “completar” o banco de dados com informações consolidadas na literatura (VON SPERLING, 2014);
- c) **Em verde:** pela falta de informações de alguns tipos de tratamento de esgoto, optou-se por “completar” o banco de dados com informações consolidadas na literatura (DOTRO *et al.*, 2017);
- d) **Em azul:** corresponde aos dados trabalhados onde apenas a segunda etapa do tratamento continha informações no estudo de referência. Assim, utilizou-se os dados médios de Von Sperling (2017) e a eficiência global foi calculada em conjunto com as informações do estudo de referência;
- e) **Em vermelho:** por se tratarem de configurações com apenas uma referência encontrada, ao invés de ser utilizado os dados médios de Von Sperling (2014), a eficiência global foi calculada por meio da faixa de valores de Von Sperling (2014), com dados mínimos e máximos de remoção de poluentes, em conjunto com o valor do estudo referente.

Após os dados trabalhados, as médias e desvio padrões calculados, cada média e desvio padrão das configurações de tratamento foram transpostas para os resultados (no Capítulo 5).

Tabela 48 – Dados desmembrados de cada referência utilizada no estudo.

Sistema	Clima	Referência	UF	Município	Remoção de DBO (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de CT (unid. log)	Remoção de SST (%)	Remoção de Nam (%)	Remoção de Ntotal (%)	Remoção de Ptotal (%)
FAN	Cfb	1	PR	Curitiba	-	88,33	-	-	-	-	-
FAN	Cfa	2	SP	Campinas	79,00	75,00	-	88,41	NEG	12,60	-
<b>MÉDIA FAN:</b>					<b>79,00</b>	<b>81,67</b>	<b>-</b>	<b>88,41</b>	<b>NA</b>	<b>12,60</b>	<b>-</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>						<b>9,43</b>					
FAN + VER	Cfa	2	SP	Campinas	86,00	81,00	-	NEG	51,75	16,96	-
<b>MÉDIA FAN + VER:</b>					<b>86,00</b>	<b>81,00</b>	<b>-</b>	<b>NA</b>	<b>51,75</b>	<b>16,96</b>	<b>-</b>
RAC	Cfa	3	SP	Pederneiras	47,61	-	-	-	-	-	-
RAC	Cfa	4	SP	Botucatu	58,40	63,00	-	77,00	-	24,60	30,60
RAC	Cfa	5	SP	Campinas	-	59,63	-	90,57	-	-	-
RAC	Cfa	6	SC	Biguaçu	16,00	9,00	-	5,00	20,33	-	NEG
RAC	Cfa	7	SC	Biguaçu	16,00	17,00	-	19,00	4,85	-	NEG
RAC	Cfa	7	SC	Palhoça	47,00	43,00	-	52,00	16,00	-	20,00
<b>MÉDIA RAC:</b>					<b>37,00</b>	<b>38,33</b>	<b>-</b>	<b>48,71</b>	<b>13,73</b>	<b>24,60</b>	<b>25,30</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>19,70</b>	<b>24,49</b>	<b>-</b>	<b>36,59</b>	<b>7,99</b>		<b>7,50</b>
RAC + FAN	Cfa	5	SP	Campinas	-	70,45	-	93,34	-	-	-
<b>MÉDIA RAC + FAN:</b>					<b>-</b>	<b>70,45</b>	<b>-</b>	<b>93,34</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
RAC + SACv	Cfa	6	SC	Biguaçu	88,00	71,00	-	74,00	40,00	-	56,00
RAC + SACv	Cfa	7	SC	Biguaçu	88,00	75,00	-	83,00	47,00	-	63,00
RAC + SACv	Cfa	7	SC	Palhoça	97,00	93,00	-	94,00	94,00	-	93,00
<b>MÉDIA RAC + SACv:</b>					<b>91,00</b>	<b>79,67</b>	<b>-</b>	<b>83,67</b>	<b>60,33</b>	<b>-</b>	<b>70,67</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>5,20</b>	<b>11,72</b>	<b>-</b>	<b>10,02</b>	<b>29,37</b>	<b>-</b>	<b>19,66</b>
RAF	Cfa	5	SP	Campinas	60,0 - 75,0	51,80	~ 1,00	88,94	25,00	30,00	17,50

Sistema	Clima	Referência	UF	Município	Remoção de DBO (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de CT (unid. log)	Remoção de SST (%)	Remoção de Nam (%)	Remoção de Ntotal (%)	Remoção de Ptotal (%)
RAF	Cfa	8	PR	Campo Mourão	60,0 - 75,0	44,24	~ 1,00	72,50	21,45	35,04	4,90
<b>MÉDIA RAF:</b>					<b>60,0 - 75,0</b>	<b>48,02</b>	<b>1,00</b>	<b>80,72</b>	<b>23,23</b>	<b>32,52</b>	<b>11,20</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>60,0 - 75,0</b>	<b>5,35</b>	<b>1,00</b>	<b>11,62</b>	<b>2,51</b>	<b>3,56</b>	<b>8,91</b>
RAF + FAN	Cfa	9	RS	Vera Cruz	44,28	24,77	1 a 2	85,00	25,00	69,85	9,58
RAF + FAN	Cfa	10	RS	Vera Cruz	42,42	34,92	1 a 2	85,00	NEG	8,92	25,80
RAF + FAN	Cfa	5	SP	Campinas	81,00	67,30	1 a 2	94,33	25,00	30,00	17,50
RAF + FAN	Cfb	11	SC	Monte Carlo	41,35	39,87	1 a 2	85,00	81,84	30,00	17,50
<b>MÉDIA RAF + FAN:</b>					<b>52,26</b>	<b>41,72</b>	<b>1 a 2</b>	<b>87,33</b>	<b>43,95</b>	<b>34,69</b>	<b>17,60</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>19,20</b>	<b>18,18</b>	<b>1 a 2</b>	<b>4,67</b>	<b>32,82</b>	<b>25,46</b>	<b>6,62</b>
RAF + FAN + SACH	Cfa	9	RS	Vera Cruz	91,79	88,97	2	97,40 - 99,30	0,0 - 75,0	0,0 - 84,0	74,85
RAF + FAN + SACH	Cfa	10	RS	Vera Cruz	98,59	94,44	2	97,40 - 99,30	0,0 - 75,0	0,0 - 84,0	90,03
RAF + FAN + SACH	Cfb	11	SC	Monte Carlo	58,76	64,91	2	97,40 - 99,30	0,0 - 75,0	0,0 - 84,0	73,90
<b>MÉDIA RAF + FAN + SACH:</b>					<b>83,05</b>	<b>82,77</b>	<b>2</b>	<b>97,40 - 99,30</b>	<b>0,0 - 75,0</b>	<b>0,0 - 84,0</b>	<b>79,59</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>21,31</b>	<b>15,71</b>	<b>2</b>	<b>97,40 - 99,30</b>	<b>0,0 - 75,0</b>	<b>0,0 - 84,0</b>	<b>9,05</b>
RAF + SACv	Cfa	8	PR	Campo Mourão	92,0 - 97,50	61,40	2 a 4	94,80 - 98,60	92,12	98,39	99,60
<b>MÉDIA RAF + SACv:</b>					<b>92,0 - 97,50</b>	<b>61,40</b>	<b>2 a 4</b>	<b>94,80 - 98,60</b>	<b>92,12</b>	<b>98,39</b>	<b>99,60</b>
SACv	Cfa	8	PR	Campo Mourão	80,0 - 90,0	46,12	2 a 4	90,00	97,48	88,30	98,92
SACv	Cfb	12	PR	Curitiba	80,0 - 90,0	80,00	2 a 4	90,00	93,50	30,00	96,90
SACv	Cfa	13	PR	Medianeira	80,0 - 90,0	90,00	2 a 4	90,00	77,93	30,00	66,10
SACv	Cfa	14	PR	Londrina	80,0 - 90,0	61,79	2 a 4	73,85	65,08	30,00	73,21
<b>MÉDIA SACv:</b>					<b>80,0 - 90,0</b>	<b>69,48</b>	<b>2 a 4</b>	<b>85,96</b>	<b>83,50</b>	<b>44,58</b>	<b>83,78</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>80,0 - 90,0</b>	<b>19,46</b>	<b>2 a 4</b>	<b>8,08</b>	<b>14,90</b>	<b>29,15</b>	<b>16,59</b>
SACH	Cfa	15	PR	Curitiba	85,00	72,70	2	90,00	94,30	0,0 - 60,0	76,90

Sistema	Clima	Referência	UF	Município	Remoção de DBO (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de CT (unid. log)	Remoção de SST (%)	Remoção de Nam (%)	Remoção de Ntotal (%)	Remoção de Ptotal (%)
SACH	Cfa	16	RJ	Angra dos Reis	73,40	81,20	2	46,30	61,70	0,0 - 60,0	-
<b>MÉDIA SACH:</b>					<b>79,20</b>	<b>76,95</b>	<b>2</b>	<b>68,15</b>	<b>78,00</b>	<b>0,0 - 60,0</b>	<b>76,90</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>8,20</b>	<b>6,01</b>	<b>2</b>	<b>30,90</b>	<b>23,05</b>	<b>0,0 - 60,0</b>	<b>76,90</b>
TSE	Cfb	17	SP	São Paulo	30,0 - 35,0	45,16	0 a 1	52,52	0,0 - 30,0	0,0 - 30,0	0,0 - 35,0
TSE	Cfb	18	PR	Curitiba	19,60	50,65	0 a 1	57,95	0,0 - 30,0	0,0 - 30,0	0,0 - 35,0
<b>MÉDIA TSE:</b>					<b>26,05</b>	<b>47,91</b>	<b>0 a 1</b>	<b>55,24</b>	<b>0,0 - 30,0</b>	<b>0,0 - 30,0</b>	<b>0,0 - 35,0</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>9,12</b>	<b>3,88</b>	<b>0 a 1</b>	<b>3,84</b>	<b>0,0 - 30,0</b>	<b>0,0 - 30,0</b>	<b>0,0 - 35,0</b>
TSE + FAN	Cfa	19	SC	Gravatal	69,31	67,94	1,50	85,00	22,50	30,00	17,50
TSE + FAN	Cfa	20	SP	Campinas	80,43	65,70	1,50	84,40	13,30	17,18	19,24
TSE + FAN	Cfa	21	SP	Campinas	59,23	80,82	1,33	91,40	22,50	61,50	NEG
TSE + FAN	Cfa	22	SP	Campinas	75,70	71,02	0,63	86,30	NEG	NEG	NEG
<b>MÉDIA TSE + FAN:</b>					<b>71,17</b>	<b>71,37</b>	<b>1,24</b>	<b>86,78</b>	<b>19,43</b>	<b>36,23</b>	<b>18,37</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>9,17</b>	<b>6,67</b>	<b>0,41</b>	<b>3,18</b>	<b>5,31</b>	<b>22,81</b>	<b>1,23</b>
TSE + FAN + FAR	Cfa	23	SP	Campinas	98,72	96,47	3,04	95,60	81,52	-	32,73 - 56,27
TSE + FAN + FAR	Cfa	20	SP	Campinas	91,00	86,28	1,00	94,23	41,35	0,0 - 27,60	-
TSE + FAN + FAR	Cfa	22	SP	Campinas	96,54	95,17	2,46	94,01	-	NEG	-
<b>MÉDIA TSE + FAN + FAR:</b>					<b>95,42</b>	<b>92,64</b>	<b>2,17</b>	<b>94,61</b>	<b>61,44</b>	<b>0,0 - 27,60</b>	<b>32,73 - 56,27</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>3,98</b>	<b>5,55</b>	<b>1,05</b>	<b>0,86</b>	<b>28,40</b>	<b>0,0 - 27,60</b>	<b>32,73 - 56,27</b>
TSE + FAN + SACH	Cfb	24	SC	Caçador	92,00	95,00	2	97,40 - 99,30	41,88	0,0 - 84,0	31,94
TSE + FAN + SACH	Cfa	25	RS	Doutor Ricardo	94,23	95,00	2	97,40 - 99,30	41,88	0,0 - 84,0	40,60
TSE + FAN + SACH	Cfb	26	SC	Campos Novos	95,12	94,35	3,15	97,40 - 99,30	85,04	0,0 - 84,0	-
TSE + FAN + SACH	Cfb	27	PR	São José dos Pinhais	85,54	85,35	0,56	97,40 - 99,30	22,11	0,0 - 84,0	NEG
<b>MÉDIA TSE + FAN + SACH:</b>					<b>91,72</b>	<b>92,43</b>	<b>1,93</b>	<b>97,40 - 99,30</b>	<b>47,73</b>	<b>0,0 - 84,0</b>	<b>36,27</b>

Sistema	Clima	Referência	UF	Município	Remoção de DBO (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de CT (unid. log)	Remoção de SST (%)	Remoção de Nam (%)	Remoção de Ntotal (%)	Remoção de Ptotal (%)
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>4,33</b>	<b>4,73</b>	<b>1,06</b>		<b>26,56</b>		<b>6,12</b>
TSE + FAN + SACv	Cfa	28	RS	São Lourenço do Sul	86,93 – 90,20	87,83 – 91,91	1,44	95,44 – 97,72	0,0 – 43,64	0,0 - 84,0	13,72 – 43,92
<b>MÉDIA TSE + FAN + SACv:</b>					<b>88,57</b>	<b>89,88</b>	<b>1,44</b>	<b>96,58</b>	<b>20,59</b>	<b>0,0 - 84,0</b>	<b>28,82</b>
TSE + FAN + SACv + SACH	Cfa	28	RS	São Lourenço do Sul	94,19 – 95,64	91,53 – 94,35	1,88	84,56 – 92,28	23,79 – 58,08	0,0 – 93,60	18,52 – 47,04
<b>MÉDIA TSE + FAN + SACv + SACH:</b>					<b>94,91</b>	<b>92,94</b>	<b>1,88</b>	<b>88,42</b>	<b>40,94</b>	<b>0,0 - 84,0</b>	<b>32,78</b>
TSE + SACH	Cfa	29	PR	Irati	89,88	86,23	1,24	96,00	36,25	40,50	61,91
TSE + SACH	Cfa	30	SC	Santo Amaro da Imperatriz	89,88	88,10	2	92,00	34,55	40,50	31,94
TSE + SACH	Cfa	30	SC	Florianópolis	89,88	88,10	2	96,00	29,45	40,50	31,94
TSE + SACH	Cfb	30	SC	Videira	89,88	81,10	2	96,00	61,75	40,50	31,94
TSE + SACH	Cfa	30	SC	Tubarão	89,88	92,30	2	92,80	57,50	40,50	31,94
TSE + SACH	Cfa	31	SC	Agronômica	98,65	98,60	2	81,20	71,95	40,50	31,94
TSE + SACH	Cfb	31	SC	Videira	81,78	78,30	2	96,00	62,60	2,25	31,94
TSE + SACH	Cfa	31	SC	Tubarão	89,50	87,40	2	94,80	48,15	72,80	31,94
TSE + SACH	Cfb	31	SC	São Joaquim	86,50	90,20	2	81,20	54,10	40,50	31,94
<b>MÉDIA TSE + SACH:</b>					<b>89,54</b>	<b>87,81</b>	<b>1,92</b>	<b>91,78</b>	<b>50,70</b>	<b>39,84</b>	<b>35,27</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>4,37</b>	<b>5,92</b>	<b>0,25</b>	<b>6,18</b>	<b>14,58</b>	<b>17,69</b>	<b>9,99</b>
TSE + SACv	Cfa	32	PR	Campo Mourão	87,10	88,20	2 a 4	96,00	36,25	40,50	76,90
TSE + SACv	Cfa	32	PR	Rancho Alegre d'Oeste	84,30	87,40	2 a 4	96,00	36,25	40,50	76,20
TSE + SACv	Cfa	32	PR	Corumbataí do Sul	84,00	88,00	2 a 4	96,00	36,25	40,50	82,50
TSE + SACv	Cfa	33	PR	Campo Mourão	88,40	87,40	2 a 4	96,00	36,25	40,50	78,95
TSE + SACv	Cfa	33	PR	Rancho Alegre d'Oeste	82,65	85,15	2 a 4	96,00	36,25	40,50	71,06

Sistema	Clima	Referência	UF	Município	Remoção de DBO (%)	Remoção de DQO (%)	Remoção de CT (unid. log)	Remoção de SST (%)	Remoção de Nam (%)	Remoção de Ntotal (%)	Remoção de Ptotal (%)
TSE + SACv	Cfb	34	SC	Videira	89,88	84,75	2 a 4	79,18	64,81	40,50	31,94
TSE + SACv	Cfa	35	PR	Francisco Beltrão	92,52	94,93	2 a 4	96,00	36,25	41,71	83,34
<b>MÉDIA TSE + SACv:</b>					<b>86,98</b>	<b>87,98</b>	<b>2 a 4</b>	<b>93,60</b>	<b>40,33</b>	<b>40,67</b>	<b>71,56</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>3,56</b>	<b>3,35</b>		<b>6,36</b>	<b>10,79</b>	<b>0,46</b>	<b>17,95</b>
TSE + SACv + SACH	Cfb	34	SC	Videira	97,20 – 99,35	94,83 – 95,52	2 a 4	85,23 – 88,51	81,11 – 86,78	0,0 – 88,80	0,0 – 72,54
<b>MÉDIA TSE + SACv + SACH:</b>					<b>98,48</b>	<b>95,17</b>	<b>2 a 4</b>	<b>86,87</b>	<b>83,94</b>	<b>0,0 – 88,80</b>	<b>0,0 – 72,54</b>
VER	Cfa	2	SP	Campinas	61,00	63,00	-	49,00	22,58	-	-
VER	Cfa	36	SP	Campinas	84,00	72,75	-	89,00	43,86	11,11	-
VER	Cfa	37	RS	Santa Cruz do Sul	87,00	92,00	-	99,00	92,00	91,00	NEG
<b>MÉDIA VER:</b>					<b>77,33</b>	<b>75,92</b>	<b>-</b>	<b>79,00</b>	<b>52,81</b>	<b>51,06</b>	<b>NEG</b>
<b>DESVIO PADRÃO:</b>					<b>14,22</b>	<b>14,76</b>	<b>-</b>	<b>26,46</b>	<b>35,57</b>	<b>56,49</b>	<b>-</b>

FONTE: <sup>1</sup>Paula *et al.* (2015); <sup>2</sup>Madrid (2016); <sup>3</sup>Postigo *et al.* (2017); <sup>4</sup>Franceschini (2019); <sup>5</sup>Javarez Junior *et al.* (2007); <sup>6</sup>Trein *et al.* (2015a); <sup>7</sup>Trein *et al.* (2015b); <sup>8</sup>Mello (2013); <sup>9</sup>Kohler *et al.* (2015); <sup>10</sup>Zerwes (2013); <sup>11</sup>Silva (2018); <sup>12</sup>Morais (2014); <sup>13</sup>Marchesi (2020); <sup>14</sup>Nunes (2020); <sup>15</sup>Ceve (2015); <sup>16</sup>Carvalho *et al.* (2015); <sup>17</sup>Chaves *et al.* (2019); <sup>18</sup>Altvater (2008); <sup>19</sup>Oliveira *et al.* (2015); <sup>20</sup>Gomes (2015); <sup>21</sup>Figueiredo (2019); <sup>22</sup>Cruz (2009); <sup>23</sup>Dominato (2011) e Tonon *et al.* (2015); <sup>24</sup>Nava e Lima (2012); <sup>25</sup>Secchi *et al.* (2016); <sup>26</sup>Rodrigues *et al.* (2015); <sup>27</sup>Rosa *et al.* (2020); <sup>28</sup>Teske e Warchow (2017); <sup>29</sup>Schimer *et al.* (2009); <sup>30</sup>Sezerino *et al.* (2015); <sup>31</sup>Philippi *et al.* (2006); <sup>32</sup>Parolin *et al.* (2012); <sup>33</sup>Pagliari Junior *et al.* (2011); <sup>34</sup>Monteiro *et al.* (2015); <sup>35</sup>Silveira e Arsego (2014); <sup>36</sup>Madrid *et al.* (2019); <sup>37</sup>Rothmund e Becker Junior (2018).