



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Igor Catão Martins Vaz

Análise do Ciclo de Vida de sistemas de captação de água pluvial por telhados e pavimentos permeáveis em edificações universitárias brasileiras

Florianópolis, Brasil
2022

Igor Catão Martins Vaz

Análise do Ciclo de Vida de sistemas de captação de água pluvial por telhados e pavimentos permeáveis em edificações universitárias brasileiras

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. EneDir Ghisi, PhD.

Florianópolis, Brasil

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Martins Vaz, Igor Catão

Análise do Ciclo de Vida de sistemas de captação de água pluvial por telhados e pavimentos permeáveis em edificações universitárias brasileiras / Igor Catão Martins Vaz ; orientador, Enedir Ghisi, 2022.

241 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Sistema urbano de drenagem sustentável. 3. Captação de água pluvial. 4. Análise do ciclo de vida. 5. Pavimento permeável. I. Ghisi, Enedir. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Igor Catão Martins Vaz

Análise do Ciclo de Vida de sistemas de captação de água pluvial por telhados e pavimentos permeáveis em edificações universitárias brasileiras

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. EneDir Ghisi, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, PhD.

Universidade Federal do Pará

Profa. Andreza Kalbusch, Dra.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** da dissertação de mestrado que foi julgada adequada para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Coordenação do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil

Prof. EneDir Ghisi, PhD.

Orientador

Este trabalho é dedicado a todos que trabalham em prol
do planeta.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio, carinho e amizade compartilhados. Sem eles não seria capaz de realizar meus sonhos e objetivos de vida, bem como ter a visão crítica que me auxilia a continuar a pesquisa sobre sustentabilidade.

Aos meus amigos e colegas de graduação e pós-graduação, por sempre me manterem com ambição em me tornar uma pessoa mais impactante e batalhadora no mundo. Deixo meu mais sincero agradecimento a todos que de alguma forma auxiliaram para que eu continue no caminho de estudar e evoluir a sustentabilidade no mundo. Poderia citar nomes, mas seriam demasiados exemplos. Tenho toda a sorte do mundo em ter tantas pessoas que me apoiam e saibam que este trabalho é de vocês também.

Ao meu vô, Laércio, por ter sido um exemplo de profissional que quero seguir para a vida, com integridade, responsabilidade e caráter. E a minha vó, Marisa, por me ensinar como uma pessoa deve ser leve, humilde e carinhosa. Aos meus avós Beatriz e Nelson, por terem me servido de inspiração para o mundo acadêmico, bem como todas as reflexões necessárias para a evolução da sociedade e ciência no Brasil.

Ao doutorando Lucas Niehuns Antunes, por sempre ter me ajudado na pesquisa e ter evoluído o debate acerca da produção científica. Deixo meu agradecimento por todos os trabalhos produzidos juntos e pelo envolvimento na pesquisa sobre sustentabilidade na construção civil.

Ao professor Enedir Ghisi pela amizade de anos, companheirismo na pesquisa e por todos os comentários e auxílios para a evolução desta dissertação para que hoje seja o trabalho que é. Deixo meu mais sincero elogio e agradeço pela inspiração que és para os novos cientistas do país. Também aproveito para agradecer à professora Liseane Padilha Thives, por toda a inspiração e amizade que também me motivaram a produzir esta pesquisa. Espero um dia ser um professor com tantas qualidades como vocês dois.

Aos membros da banca por terem aceitado auxiliar na evolução da pesquisa. Agradeço pelo tempo disponibilizado e pelos avanços de pesquisa em seus respectivos temas. A ciência brasileira e mundial ganha muito com vocês.

À UFSC por tudo que me ofereceu desde que iniciei meus estudos na graduação. O espaço da UFSC é capaz de pluralizar diversos temas acadêmicos e é fundamental para a evolução da pesquisa no Brasil.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa. Esta dissertação foi realizada com apoio da CAPES - Código de Financiamento 001. E também à UFSC pelo apoio na obtenção da bolsa.

*“A Terra é, até agora, o único mundo conhecido que abriga a vida.
Não há nenhum outro lugar, ao menos no futuro próximo,
para onde nossa espécie possa migrar. Visitar, sim.
Goste-se ou não, no momento a Terra é o nosso posto.”
(Sagan, 1994)*

RESUMO

Este trabalho buscou avaliar comparativamente os impactos ambientais de diferentes sistemas de captação de água pluvial, com e sem o uso de pavimentos permeáveis, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Foi definida uma edificação base universitária para o estudo de caso, com referência em uma das edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O objetivo foi de obter uma edificação universitária com consumo e usos finais de água pré-estabelecidos. Foram então obtidos os padrões pluviométricos de seis cidades brasileiras com climas distintos e diferentes agrupamentos pluviométricos, de modo a compreender as variações da pluviometria nos resultados. Com o objeto de estudo definido, foram modelados seis cenários de fornecimento hídrico, pavimentação e drenagem. O primeiro cenário foi considerado o caso base, com pavimentação impermeável e fornecimento hídrico somente pela concessionária local. Os demais cinco cenários contemplam combinações de captação de água pluvial por telhados e pavimentos, bem como a variação do revestimento permeável em dois tipos, constituídos com materiais asfálticos e de cimento Portland. Os resultados da ACV corroboram com o menor impacto ambiental dos sistemas alternativos, com o sistema convencional apresentando maiores impactos potenciais em pontuação única. Dentre os cenários com captação de água pluvial, a captação por meio de telhados demonstrou-se a de menor impacto geral. Este apresentou 40% de redução do impacto ambiental potencial em relação ao cenário padrão de fornecimento hídrico e pavimentação. Tal resultado baseia-se na possibilidade de fornecer água com menor quantidade de materiais adicionais em relação ao caso base. Em contrapartida, não são obtidos para este cenário muitos dos benefícios da pavimentação permeável, como a redução da vazão de pico e a melhoria da qualidade da água infiltrada. A avaliação dos revestimentos permeáveis resultou no pavimento em concreto cimento Portland como menos impactante. Obteve-se este resultado devido à incorporação dos benefícios da fase de uso, relacionados ao albedo da estrutura, carbonatação e melhoria da qualidade da água. Os cenários com material asfáltico permeável também obtiveram benefícios na fase de uso, com a melhoria da qualidade da água. De modo geral, a fase de uso fez-se fundamental para modificação dos resultados e tomada de decisão a partir da ACV. Por fim, a análise de sensibilidade apresentou variabilidades existentes nos cenários avaliados. Perceberam-se diferenças nos resultados estatísticos entre os cenários, porém com similar avaliação final. Conclui-se que a ACV foi capaz de fornecer resultados sobre os possíveis impactos ambientais, melhorias e especificidades dos cenários modelados.

Palavras-chave: Sistema Urbano de Drenagem Sustentável, Avaliação do Ciclo de Vida, Captação de água pluvial, Sustentabilidade no ambiente construído, Pavimento permeável.

ABSTRACT

This study aimed to assess the environmental impacts of different rainwater harvesting systems, with and without permeable pavements, through LCA. A university base building was defined for the case study, based on one of the buildings of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). The goal was to obtain a university building with pre-established water consumption and end-uses. The pluviometric patterns of six Brazilian cities with different climates were then obtained to assess the variations of pluviometry in the results. With the object of study defined, six water supply, paving, and drainage scenarios were modelled. The first scenario was considered the base case, with impermeable paving and water supply only by the local utility. The other five scenarios considered combinations of rainwater harvesting by roofs and pavements and the variation of the permeable surface in two types, made of asphalt and Portland cement materials. The results of the LCA corroborate the lower environmental impact of the alternative systems, with the conventional scenario having the highest final score after grouping the impacts. Among the scenarios with rainwater harvesting, roof harvesting proved to have the lowest overall impact. This scenario presented a 40% reduction in the potential environmental impact compared to the standard scenario of water supply and paving. This result is based on the possibility of providing water with fewer additional processes. In contrast, many of the benefits of permeable paving, such as reduced peak flow and improved infiltrated water quality, are not obtained for this scenario. The evaluation of the permeable pavements resulted in Portland cement concrete pavement as the least impactful. This result was obtained due to the incorporation of the benefits of the use phase related to the albedo of the structure, carbonation and water quality improvement. The scenarios with permeable asphalt material also benefited in the use phase, improving water quality. The use phase was fundamental for changing the results and decision-making based on the LCA. Finally, the sensitivity analysis showed variability in the scenarios evaluated. One could notice differences in the statistical results between the scenarios but a similar final evaluation. It was concluded that the LCA could provide results on the possible environmental impacts, improvements and specificities of the modelled scenarios.

Keywords: Sustainable Urban Drainage System, Life Cycle Assessment, Rainwater harvesting, Built-environment sustainability, Permeable pavement.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo geral	25
1.2.2	Objetivos específicos	25
1.2.3	Estrutura do trabalho	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E RESILIÊNCIA URBANA	26
2.1.1	Aumento de temperatura do ar e ilhas de calor urbano	28
2.1.2	Escassez hídrica	29
2.1.3	Mudanças pluviométricas	32
2.1.4	Modelos climáticos futuros	35
2.2	SUSTENTABILIDADE URBANA	36
2.2.1	Estratégias urbanas para ilhas de calor urbano e calor extremo	36
2.2.2	Estratégias urbanas para escassez hídrica	38
2.2.3	Estratégias urbanas para precipitação extrema e drenagem ineficiente	40
2.2.4	Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS)	43
2.2.5	Pavimentos permeáveis	44
2.2.6	Captação de água pluvial descentralizada	47
2.2.7	Pavimentos permeáveis e captação de água pluvial	51
2.3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	56
2.3.1	Etapas da avaliação do ciclo de vida	58
2.3.1.1	Objetivo e escopo	58
2.3.1.2	Inventário	60
2.3.1.3	Avaliação do impacto ambiental	60
2.3.1.4	Interpretação dos resultados	62
2.3.2	Estudos de ACV	62
2.3.2.1	ACV de sistemas de captação de água pluvial	64
2.3.2.2	ACV de pavimentos permeáveis	69
2.3.2.3	ACV de sistemas de captação de água pluvial por pavimentos permeáveis	73
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
3	MÉTODO	77
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO MÉTODO	77
3.2	CENÁRIOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL	79
3.3	OBJETO DE ESTUDO	85

3.3.1	Edificação modelo	85
3.3.2	Estacionamento e telhados	86
3.3.3	Localidades	86
3.3.4	Consumo hídrico e usos finais de água	87
3.3.5	Dados pluviométricos e curvas IDF	87
3.3.6	Simulação do potencial de economia de água potável	89
3.3.7	Dimensionamento dos pavimentos	92
3.3.7.1	Dimensionamento hidráulico e da drenagem	93
3.3.7.2	Dimensionamento estrutural	96
3.3.8	Tubulações, motobombas e dispositivos complementares	97
3.3.9	Manutenção	100
3.3.10	Qualidade da água pluvial	101
3.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	102
3.4.1	Considerações iniciais	103
3.4.2	Objetivo e escopo da ACV	103
3.4.2.1	Função de comparação e unidade funcional	103
3.4.2.2	Horizonte de tempo	104
3.4.2.3	Fronteiras de análise	104
3.4.2.4	Omissões e exclusões da ACV	106
3.4.3	Inventário	107
3.4.3.1	Considerações iniciais	107
3.4.3.2	Transporte	108
3.4.3.3	Manutenção	108
3.4.3.4	Consumo energético das motobombas	109
3.4.3.5	Fase de uso e benefícios ambientais	109
3.4.3.6	Destinação final dos componentes	112
3.4.4	Método de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida	113
3.4.5	Interpretação	115
3.4.6	Agrupamento dos resultados	115
3.4.7	Avaliação da qualidade dos dados	116
3.4.8	Análise de sensibilidade dos resultados	117
3.4.9	Considerações finais da ACV	119
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO MÉTODO	119
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	120
4.1	PLUVIOMETRIA, PRECIPITAÇÃO FUTURA E CURVAS IDF	120
4.2	CONSUMO HÍDRICO DE EDIFICAÇÕES UNIVERSITÁRIAS	124
4.3	MODELAGEM DOS SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL	125
4.3.1	Pavimento do estacionamento	127
4.3.1.1	Dimensionamento estrutural	127

4.3.1.2	Dimensionamento hidráulico	128
4.3.1.3	Perfis e valores finais	131
4.3.2	Drenagem do pavimento	132
4.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS SISTEMAS PROPOSTOS . .	134
4.4.1	Objetivo e escopo	134
4.4.2	Inventário	136
4.4.2.1	Transporte	136
4.4.2.2	Materiais	136
4.4.2.3	Energia necessária para bombeamento	136
4.4.2.4	Disponibilização de água potável	137
4.4.2.5	Desinfecção da água pluvial	138
4.4.2.6	Recorrência e manutenção	138
4.4.2.7	Albedo das diferentes superfícies	138
4.4.2.8	Carbonatação	139
4.4.2.9	Melhoria da qualidade da água	139
4.4.2.10	Omissão de processos	140
4.4.2.11	Processos utilizados no <i>OpenLCA</i>	140
4.4.3	Avaliação do impacto ambiental	140
4.4.3.1	Categorias <i>midpoint</i> - Análise geral	140
4.4.3.2	Comparação entre os cenários com pavimento convencional (A e B)	147
4.4.3.3	Comparação entre os cenários base e de pavimentação permeável (Ca e A)	149
4.4.3.4	Comparação entre os cenários de diferente superfície de captação (Ca e B)	151
4.4.3.5	Comparação entre captação parcial e completa (Ca e Da)	153
4.4.3.6	Comparação entre os tipos de revestimentos permeáveis (Ca e Cc) .	155
4.4.3.7	Categorias <i>endpoint</i> - Análise geral	158
4.4.4	Interpretação	160
4.4.4.1	Quantificação do transporte	160
4.4.4.2	Sistema de qualidade de dados	161
4.4.4.3	Valor social, estético e educacional	163
4.4.4.4	Incertezas de projeto	164
4.4.4.5	Relevância do processo de produção de água para a ACV	165
4.4.4.6	Normalização e ponderação do nível <i>endpoint</i>	166
4.4.4.7	Introdução de reciclagem no sistema	166
4.4.5	Discussão sobre diferenças entre as cidades	167
4.4.5.1	Precipitação prévia e potencial de economia de água potável	167
4.4.5.2	Curvas Intensidade-Duração-Frequência	168
4.4.5.3	Projeto de drenagem	169

4.4.5.4	Mudança climática	169
4.4.5.5	Especificidades locais	170
4.4.6	Potenciais melhorias para o sistema	171
4.4.7	Análise de sensibilidade (Simulações de Montecarlo)	171
4.4.7.1	Resultados <i>Midpoint</i>	171
4.4.7.2	Resultados <i>Endpoint</i>	174
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	177
5	CONCLUSÕES	178
5.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	181
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	182
	REFERÊNCIAS	183
	APÊNDICE A – DADOS DAS LOCALIDADES UTILIZADAS	213
	APÊNDICE B – POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL	
	POR CIDADE	214
	APÊNDICE C – INVENTÁRIO DE MATERIAIS E TRANSPORTE .	216
	APÊNDICE D – PROCESSOS E FLUXOS CONSIDERADOS NO	
	OPENLCA	222
	APÊNDICE E – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	224

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mudança regional nos padrões de ocorrência de calor extremo, precipitação extrema e seca na América do Sul.	27
Figura 2 – Principais riscos enfrentados pela humanidade.	30
Figura 3 – Tendência de mudança climática no número de eventos extremos (A) e na intensidade de eventos extremos (B) na região sudeste e nordeste do Brasil.	33
Figura 4 – Projeção da precipitação máxima mensal em Florianópolis (SC) no século XXI para o RCP de 8.5.	34
Figura 5 – Projeção da precipitação máxima mensal em Curitiba (PR) no século XXI para o RCP de 8.5.	34
Figura 6 – Tipos de pavimentos frios usados na mitigação de ilhas de calor urbano.	37
Figura 7 – Evolução do conceito de cidade sensível à água.	39
Figura 8 – Classificação dos termos de drenagem urbana quanto ao foco e especificidade.	42
Figura 9 – Evolução das publicações sobre pavimentos permeáveis mundialmente.	45
Figura 10 – Nuvem de palavras gerada com as palavras-chave indicadas pelos autores.	46
Figura 11 – Nuvem de palavras gerada com as palavras-chave indexadas nos artigos.	46
Figura 12 – Principais temas encontrados durante a revisão de bibliografia sobre pavimentos permeáveis.	47
Figura 13 – Modelo de captação direta e indireta de água pluvial por telhados.	48
Figura 14 – Modelo de captação de água pluvial por pavimentos permeáveis.	52
Figura 15 – Evolução temporal da produção científica com termos sobre captação de água pluvial e pavimentos permeáveis mundialmente.	54
Figura 16 – Quatro etapas para a realização de uma ACV.	59
Figura 17 – Evolução do número de artigos de ACV no Brasil.	63
Figura 18 – Diagrama de Venn com os números de publicações por tema relevante à pesquisa, mundialmente.	64
Figura 19 – Exemplo feito por Leong <i>et al.</i> (2019) dos diferentes fluxos e processos que podem ser considerados em uma ACV de fornecimento hídrico.	69
Figura 20 – Fronteira de análise do cenário com pavimento permeável e captação de água pluvial.	75

Figura 21 – Fronteira de análise do cenário com pavimento convencional e drenagem tradicional.	75
Figura 22 – Fluxograma do método utilizado.	78
Figura 23 – Cenário A - Caso base (Sem captação de água pluvial e com pavimento convencional).	81
Figura 24 – Cenário B - Captação telhado (Com captação de água pluvial pelo telhado e pavimento convencional).	82
Figura 25 – Cenário C - Captação pavimento (Com captação de água pluvial pelo pavimento permeável e drenagem do telhado).	83
Figura 26 – Cenário D - Captação total (Com captação de água pluvial pelo pavimento permeável e pelo telhado).	84
Figura 27 – Edificação modelo escolhida para o estudo.	85
Figura 28 – Modelos de pavimento permeável utilizados no estudo (sem escala).	92
Figura 29 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário A - Caso base.	105
Figura 30 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário B - Captação telhado.	106
Figura 31 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário C - Captação pavimento.	106
Figura 32 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário D - Captação total.	106
Figura 33 – Estrutura de possíveis aspectos avaliados durante a fase de uso de sistemas de pavimentos permeáveis.	110
Figura 34 – Matriz de parâmetros de qualidade dos dados.	117
Figura 35 – Fluxograma da análise de sensibilidade por meio de simulação de Montecarlo.	118
Figura 36 – Pluviometria anual das cidades selecionadas.	120
Figura 37 – Pluviometria mensal das cidades selecionadas.	121
Figura 38 – Mapa com a distribuição mensal média das precipitações.	121
Figura 39 – Mapa com a projeção de variação mensal (mm/mês) e anual (mm/ano) de precipitação.	122
Figura 40 – Pluviometria diária (100 maiores valores) das cidades selecionadas.	123
Figura 41 – Pluviometria extrema (100 maiores valores de agrupamentos de 5 dias) das cidades selecionadas.	123
Figura 42 – Volumes precipitados obtidos por meio das curvas IDF.	124
Figura 43 – Consumo mensal do CTC durante o período disponível de faturas.	125
Figura 44 – Consumo diário do CTC utilizado na simulação.	125
Figura 45 – Potencial de economia de água potável para os diferentes reservatórios inferiores simulados.	126
Figura 46 – Espessura da camada <i>reservoir course</i> para atendimento estrutural.	127
Figura 47 – Croqui do cenário D com a demonstração dos drenos.	129
Figura 48 – Vazão dos drenos profundos dos pavimentos permeáveis.	129

Figura 49 – Precipitação incidente no pavimento permeável.	129
Figura 50 – Altura da lâmina de água na <i>reservoir course</i>	130
Figura 51 – Perfis finais obtidos para os três pavimentos utilizados (sem escala).	131
Figura 52 – Modelo da quantificação da drenagem do sistema - Exemplo do Cenário B com a precipitação de Florianópolis (sem escala).	133
Figura 53 – Comparação dos indicadores de impacto <i>midpoint</i> entre os seis cenários.	142
Figura 54 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário base - A.	143
Figura 55 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo telhado - B.	143
Figura 56 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento asfáltico permeável - Ca.	144
Figura 57 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento de concreto permeável - Cc.	144
Figura 58 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento asfáltico permeável e pelo telhado - Da.	145
Figura 59 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento de concreto permeável e pelo telhado - Dc.	145
Figura 60 – Percentual de impacto <i>midpoint</i> comparativo entre os cenários A e B, sem o inventário dos pavimentos.	148
Figura 61 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>) dos cenários A e B, sem o inventário dos pavimentos.	149
Figura 62 – Percentual de impacto <i>midpoint</i> comparativo entre os cenários A e Ca.	150
Figura 63 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>) dos cenários A e Ca.	151
Figura 64 – Percentual de impacto <i>midpoint</i> comparativo entre os cenários B e Ca.	152
Figura 65 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>) dos cenários B e Ca.	153
Figura 66 – Percentual de impacto <i>midpoint</i> comparativo entre os cenários Ca e Da.	154
Figura 67 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>) dos cenários Ca e Da.	155
Figura 68 – Percentual de impacto <i>midpoint</i> comparativo entre os cenários Ca e Cc.	156
Figura 69 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>) dos cenários Ca e Cc.	157
Figura 70 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>) normalizada em relação ao valor máximo da categoria, nos seis cenários.	158
Figura 71 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>) normalizada e ponderada, para os três grupos e seis cenários.	158
Figura 72 – Comparação de pontuação única (<i>endpoint</i>), normalizada e ponderada, dos seis cenários.	159

Figura 73 – Comparação do percentual de impacto do processo de transporte para cada categoria e cenário simulado.	160
Figura 74 – Matriz de qualidade de dados média para os dezoito indicadores <i>midpoint</i> e os seis cenários simulados.	162
Figura 75 – Variação dos resultados do indicador - Formação de partículas finas.	172
Figura 76 – Resultados Montecarlo em <i>endpoint</i> para os seis cenários simulados e três unidades.	175
Figura 77 – Resultados Montecarlo em <i>endpoint</i> agrupado.	176
Figura 78 – Potencial de economia de água potável para Belo Horizonte.	214
Figura 79 – Potencial de economia de água potável para Brasília.	214
Figura 80 – Potencial de economia de água potável para Florianópolis.	214
Figura 81 – Potencial de economia de água potável para Manaus.	215
Figura 82 – Potencial de economia de água potável para Salvador.	215
Figura 83 – Potencial de economia de água potável para São Paulo.	215
Figura 84 – Variação dos resultados do indicador - Depleção de recursos fósseis.	224
Figura 85 – Variação dos resultados do indicador - Ecotoxicidade das águas potáveis.	225
Figura 86 – Variação dos resultados do indicador - Eutrofização das águas potáveis.	226
Figura 87 – Variação dos resultados do indicador - Aquecimento global.	227
Figura 88 – Variação dos resultados do indicador - Toxicidade humana cancerígena.	228
Figura 89 – Variação dos resultados do indicador - Toxicidade humana não-cancerígena.	229
Figura 90 – Variação dos resultados do indicador - Radiação ionizante.	230
Figura 91 – Variação dos resultados do indicador - Uso do solo.	231
Figura 92 – Variação dos resultados do indicador - Ecotoxicidade das águas marinhas.	232
Figura 93 – Variação dos resultados do indicador - Eutrofização das águas marinhas.	233
Figura 94 – Variação dos resultados do indicador - Depleção de recursos minerais.	234
Figura 95 – Variação dos resultados do indicador - Formação de ozônio, Saúde humana.	235
Figura 96 – Variação dos resultados do indicador - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres.	236
Figura 97 – Variação dos resultados do indicador - Depleção de ozônio na estratosfera.	237
Figura 98 – Variação dos resultados do indicador - Acidificação dos solos.	238
Figura 99 – Variação dos resultados do indicador - Ecotoxicidade dos solos.	239
Figura 100 – Variação dos resultados do indicador - Consumo de água (m ³).	240

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Termos relacionados à drenagem urbana sustentável.	41
Quadro 2 – Agrupamento das capitais brasileiras em relação à pluviometria. . .	51
Quadro 3 – Processos obrigatórios e opcionais da AICV.	61
Quadro 4 – Manutenção recomendada para captação de água pluvial em telha- dos.	101
Quadro 5 – Manutenção recomendada para pavimentos permeáveis.	101
Quadro 6 – Grupos considerados para o inventário da ACV.	107
Quadro 7 – Categorias <i>midpoint</i> e área de proteção <i>endpoint</i> do método de AICV.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos artigos de captação de água pluvial e pavimentos permeáveis oriundos da UFSC.	53
Tabela 2 – Resumo do número de artigos encontrado pelas estratégias de busca na Scopus mundialmente.	63
Tabela 3 – Resumo das características dos principais artigos encontrados na Scopus sobre ACV e captação de água pluvial e água cinza.	68
Tabela 4 – Resumo das características dos principais artigos encontrados na Scopus sobre ACV e pavimentos permeáveis.	70
Tabela 5 – Fonte dos parâmetros das curvas IDF utilizadas no estudo	88
Tabela 6 – Parâmetros utilizados para simulação no Netuno.	91
Tabela 7 – Parâmetros utilizados para o dimensionamento hidráulico.	94
Tabela 8 – Parâmetros utilizados para o dimensionamento estrutural.	97
Tabela 9 – Parâmetros qualitativos da NBR 16783.	102
Tabela 10 – Potencial de economia de água potável (%) para o reservatório ótimo.	127
Tabela 11 – Resumo dos dispositivos hidráulicos dimensionados.	133
Tabela 12 – Quantitativo de itens necessários para drenagem do estacionamento.	134
Tabela 13 – Vida útil dos componentes avaliados na ACV.	135
Tabela 14 – Distância de transporte para os diferentes componentes utilizados na ACV.	137
Tabela 15 – Quantitativo da diminuição de poluentes pela filtração de pavimentos permeáveis.	140
Tabela 16 – Impactos finais em categoria <i>midpoint</i> dos seis cenários avaliados.	141
Tabela 17 – Pontuação <i>endpoint</i> a ser conferida para o consumo de água em cada um dos cenários e cidades (volume do reservatório inferior de água potável com 45.000 litros).	168
Tabela 18 – Resultados Montecarlo do indicador - Formação de partículas finas.	172
Tabela 19 – Dados das localidades avaliadas na pesquisa.	213
Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV.	216
Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).	217
Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).	218
Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).	219
Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).	220
Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).	221
Tabela 21 – Processos do Ecoinvent 3.8 utilizados na ACV.	222
Tabela 21 – Processos do Ecoinvent 3.8 utilizados na ACV (continuação).	223
Tabela 22 – Resultados Montecarlo do indicador - Depleção de recursos fósseis.	224

Tabela 23 – Resultados Montecarlo do indicador - Ecotoxicidade das águas potáveis.	225
Tabela 24 – Resultados Montecarlo do indicador - Eutrofização das águas potáveis.	226
Tabela 25 – Resultados Montecarlo do indicador - Aquecimento global.	227
Tabela 26 – Resultados Montecarlo do indicador - Toxicidade humana cancerígena.	228
Tabela 27 – Resultados Montecarlo do indicador - Toxicidade humana não-cancerígena.	229
Tabela 28 – Resultados Montecarlo do indicador - Radiação ionizante.	230
Tabela 29 – Resultados Montecarlo do indicador - Uso do solo.	231
Tabela 30 – Resultados Montecarlo do indicador - Ecotoxicidade das águas marinhas.	232
Tabela 31 – Resultados Montecarlo do indicador - Eutrofização das águas marinhas.	233
Tabela 32 – Resultados Montecarlo do indicador - Depleção de recursos minerais.	234
Tabela 33 – Resultados Montecarlo do indicador - Formação de ozônio, Saúde humana.	235
Tabela 34 – Resultados Montecarlo do indicador - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres.	236
Tabela 35 – Resultados Montecarlo do indicador - Depleção de ozônio na estratosfera.	237
Tabela 36 – Resultados Montecarlo do indicador - Acidificação dos solos.	238
Tabela 37 – Resultados Montecarlo do indicador - Ecotoxicidade dos solos.	239
Tabela 38 – Resultados Montecarlo do indicador - Consumo de água (m ³).	240

1 INTRODUÇÃO

A demanda social acerca da sustentabilidade dos sistemas urbanos é crescente em todo o mundo, principalmente com o avanço das mudanças climáticas e o receio acerca da qualidade de vida. Desde o início da década de 1980, vê-se constantes debates acerca do desenvolvimento sustentável, culminando com a definição do termo no relatório de Brundtland em 1987. O termo "desenvolvimento sustentável" é definido como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das gerações futuras de satisfazer suas necessidades (LASCHEFSKI, 2013). De acordo com Goni *et al.* (2015), entre 1987 e 2010 houve crescente produção científica de artigos sobre sustentabilidade, com o aumento de mais de seis vezes na produção anual de artigos no período. Olawumi e Chan (2018) também avaliaram a produção científica sobre sustentabilidade no ambiente construído e concluíram sobre os principais focos de pesquisa, palavras chave e pesquisadores, concordando com o crescente aumento do número de artigos e do interesse mundial sobre a sustentabilidade no ambiente construído.

O aumento da produção científica sobre sustentabilidade visa direcionar positivamente a construção civil para obtenção de estratégias resilientes e ambientalmente menos impactantes. A resiliência urbana foca na capacidade das cidades de se adaptar às diferentes condições impostas pelas mudanças populacionais e climáticas, por meio de estratégias de engenharia que auxiliem na qualidade de vida e manutenção do conforto dos usuários. Tem-se conhecimento também que a construção civil é responsável por grande parte da geração de dióxido de carbono, de consumo energético e de consumo de materiais mundialmente, dependendo do país, matriz energética, métodos construtivos, entre demais fatores (GASQUES *et al.*, 2014). Gasques *et al.* (2014), por exemplo, apresentam um breve histórico dos impactos ambientais dos materiais utilizados na construção civil, no qual concluem que os principais materiais impactam na geração de resíduos, contaminação, geração de poeira, alteração do uso e ocupação do solo, entre demais fatores.

Sobre as mudanças climáticas, em agosto de 2021, foi publicado o sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) com diversas conclusões obtidas a partir da avaliação rigorosa de produções científicas por todo o globo. O relatório apresenta pela primeira vez um consenso comprovando os efeitos antrópicos e seu papel na influência das mudanças dos padrões climáticos. O aumento nas concentrações de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, além de demais gases em menor influência) é categorizado pelo relatório como inequivocadamente causado pelas influências antrópicas, e com consequências futuras continuamente crescentes. Como exemplo, na seção B do relatório (IPCC, 2021) os autores indicam possíveis padrões futuros e concordam, com grande grau de

probabilidade, com o aumento da intensidade e frequência de ondas de calor extremo, de precipitação intensa e de seca em algumas regiões do globo. Todas as tendências apresentadas demonstram insegurança futura acerca da manutenção dos padrões de pluviometria e temperatura atuais, motivo de preocupação mundial.

Em relação às mudanças pluviométricas, o aumento de frequência e intensidade de chuvas intensas é deletério por dois motivos. Em primeira instância o maior volume precipitado é capaz de sobrecarregar os sistemas urbanos de drenagem e causar estragos por meio de destruição de bens, deslizamentos, incapacidade produtiva, dentre outros efeitos. A tendência de aumento da intensidade da chuva é consequência de uma atmosfera mais quente, capaz de reter mais vapor de água e gerar volumes precipitados maiores (BLENKINSOP *et al.*, 2021).

Em segunda instância, o maior volume de precipitações intensas usualmente está associado com maior tempo de estiagem entre as precipitações e diminuição da quantidade de chuvas leves. Ou seja, desregula-se o padrão histórico de precipitação, o que conseqüentemente dificulta a gestão hídrica e manutenção dos estoques de abastecimento hídrico. Estudos recentes no tema demonstram a tendência citada em diversas regiões do mundo, com exemplo de estudos da China (CHEN, 2013) e da Alemanha (DEUMLICH; GERICKE, 2020). Também se cita que ambos os países apresentaram a ocorrência de casos de precipitação intensa em julho de 2021, com diversos problemas urbanos associados (BBC, 2021a, 2021b). Zilli *et al.* (2017), por exemplo, avaliaram as mudanças de padrão pluviométrico no sudeste brasileiro, e concluíram que a frequência e a intensidade de chuvas intensas possuem tendência de crescimento. Sobre o volume total precipitado anualmente, os autores percebem não haver uma tendência específica para o sudeste brasileiro.

O problema da escassez temporária de chuva, bem como a mudança em geral no padrão pluviométrico, torna complexa a gestão dos mananciais hídricos. São Paulo, por exemplo, apresentou secas severas em 2014 e 2015, culminando em dificuldades de abastecimento e racionamento de água entre os cidadãos (MILLINGTON, 2018; SORIANO *et al.*, 2016). Tais dificuldades usualmente estão atreladas ao perfil urbano de gestão hídrica, fato que envolve relação político-técnica com extrema complexidade. Estudos mostram que a adoção de técnicas secundárias de captação de água pluvial pelo usuário pode ser uma resposta alternativa de mitigação mesmo em locais de seca (SHARMA; SMAKHTIN, 2006; SANTOS; FARIAS, 2017), bem como o incentivo ao uso racional com aparelhos de menor consumo hídrico mesmo com abundância de água nos reservatórios. Interessa-se adotar políticas públicas que auxiliem na resiliência dos sistemas urbanos de modo a diminuir ao máximo a probabilidade de estresse hídrico por meio de junções de políticas públicas e de ações individuais dos cidadãos.

Ou seja, para resposta às futuras dificuldades de pluviometrias intensas, deve-se garantir resiliência em relação às dificuldades de abastecimento hídrico e de drena-

gem da água pluvial, ao passo que ambos os sistemas podem ser impactados. Para o abastecimento hídrico, pode-se citar a captação de água pluvial, menor pressurização da rede e uso racional de água como medidas aplicáveis para mitigação (SORIANO *et al.*, 2016). Para a drenagem urbana, podem-se aplicar conceitos de engenharia relacionados com a sustentabilidade na drenagem, como *Low Impact Development* (LID), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), *Best Management Practices* (BMPs), *Green Infrastructure* (GI), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), entre outras (FLETCHER *et al.*, 2015). As opções de técnicas urbanas mais naturais de drenagem, bem como melhor adaptadas para tratamento local da água incidente, são ferramentas importantes para a gestão pública de drenagem, de modo a resolver os problemas oriundos da transposição de águas à jusante.

Nesse contexto, uma das técnicas mais usualmente utilizadas e classificada como GI, SUDS e BMPs é o uso de pavimentos permeáveis. Os pavimentos permeáveis são amplamente estudados e aplicados mundialmente com a comprovação de inúmeros benefícios em comparação aos sistemas atuais de pavimentação (DIETZ, 2007). Os quatro principais tipos de revestimentos aplicáveis são concreto permeável, asfalto permeável, blocos intertravados de concreto permeável e pavimentos com grade de concreto ou plástico preenchidos por grama ou similares (MULLANEY; LUCKE, 2014). A possibilidade de retenção de poluentes, de diminuição do escoamento superficial, da redução das ilhas de calor urbano, da diminuição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento e da possibilidade de captar água pluvial para uso em edificações são alguns exemplos de benefícios do método (XIE *et al.*, 2019; ANTUNES *et al.*, 2020a; MARTINS VAZ *et al.*, 2020; KNABBEN *et al.*, 2016).

Outro ponto importante é o aumento da impermeabilização do meio urbano com a densificação habitacional e aumento populacional (NGUYEN *et al.*, 2019). O aumento do número de áreas impermeabilizadas dentro das cidades gera maior escoamento superficial captado pela drenagem urbana, capaz de potencializar o já crescente aumento de demanda dos sistemas de drenagem devido às mudanças climáticas e pluviométricas. Ou seja, cada vez mais interessa-se optar por sistemas que não dependam das já instaladas galerias pluviais, de modo a diminuir a sobrecarga hidráulica. A diversificação dos meios de dissipação da água pluvial é ferramenta de auxílio à resiliência futura em condições de maior volume escoado, e deve ser utilizada por meio da gestão pública como auxílio ao sistema de drenagem já existente. Desse tópico origina-se o conceito de cidade esponja, com o objetivo de atenuar os problemas de alto escoamento superficial, insuficiência de drenagem e impermeabilização dos leitos urbanos por meio de técnicas como o uso de pavimentos permeáveis.

Desse modo, com a demanda de cidades resilientes e a evolução e consolidação da técnica de pavimentação permeável, diversos autores dedicaram seus esforços para a comprovação da sustentabilidade do uso de pavimentos permeáveis. Pesquisas

focadas na avaliação ambiental (BHATT *et al.*, 2019; LU *et al.*, 2019; ANTUNES *et al.*, 2020a; LIU *et al.*, 2020), econômica (LIU *et al.*, 2020; REHAN *et al.*, 2018) e energética (MARTINS VAZ *et al.*, 2020; SINGH *et al.*, 2020) são encontradas na literatura, com grande foco para aplicação da Análise de Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta sistemática e completa de avaliação. A ACV é uma metodologia que auxilia na avaliação dos potenciais impactos ambientais de sistemas e suas alternativas, incluindo como objetivo o auxílio na definição de materiais, tecnologias, infraestruturas e projetos mais sustentáveis (REBITZER *et al.*, 2004). A ACV de pavimentos permeáveis é um tema em consolidação (ANTUNES *et al.*, 2018), o qual apresenta inúmeras dificuldades quanto à heterogeneidade dos estudos existentes, com muitas diferenças em termos de definições, como o exemplo das diferentes unidades funcionais escolhidas.

Outra dificuldade evidente é a diferença entre os efeitos considerados dentro das fronteiras de análise da ACV de sistemas de pavimentos permeáveis. Alguns estudos por exemplo incluem no escopo da ACV os efeitos do amortecimento das ilhas de calor urbano (LIU *et al.*, 2020), da captação de água pluvial e reúso nas edificações próximas (ANTUNES *et al.*, 2020a, 2020b), do aumento de combustível pela diferença na rugosidade do pavimento (LU *et al.*, 2019) e da melhoria da qualidade da água (LIU *et al.*, 2020). Outros estudos avaliam o sistema em integração ou comparação com outros tipos de dispositivos LID, de modo a otimizar o modelo de drenagem sustentável (BHATT *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2013). Porém, percebe-se que todos os estudos encontrados possuem escopos específicos e limitações de análise, com elementos do inventário e impactos ambientais considerados por alguns dos pesquisadores e desconsiderados por outros. Por exemplo, os estudos que avaliam os efeitos de captação da água pluvial e reúso em edificações (ANTUNES *et al.*, 2020a, 2020b) desconsideram os efeitos da redução das ilhas de calor urbano, da melhoria da qualidade da água extravasada, da redução do ruído de passagem de veículos, entre demais possibilidades, as quais contemplam importantes benefícios da utilização de pavimentos permeáveis.

Desse modo, percebe-se que cada vez mais se requer sustentabilidade no meio construído e na sociedade. As mudanças climáticas e socio-políticas da sociedade civilizada requerem estratégias mais resilientes e sustentáveis, de modo que o futuro esteja resguardado das ações do presente, e que a engenharia esteja focada em resolver problemas por meio da visão holística dos efeitos diretos e indiretos das decisões urbanas. Técnicas construtivas que observem tais objetivos são existentes e comumente estudadas, porém, percebe-se a necessidade de estudar a sustentabilidade por meio de análises holísticas que abordem ao máximo os benefícios e dificuldades de aplicação. Com isso, metodologias para a avaliação dos impactos ambientais, com o intuito de comprovar e melhorar os sistemas propostos, aparecem como possibilidades para a correta comparação e implantação dos sistemas, de modo a garantir a

efetividade e sustentabilidade das decisões de projeto.

1.1 JUSTIFICATIVA

As mudanças climáticas, sociais e principalmente urbanas são evidentes no século XXI, com inúmeras adaptações antrópicas de modo a atender as novas necessidades das cidades (IPCC, 2021; OLAWUMI; CHAN, 2018). A possibilidade de se adaptar é uma das qualidades inerentes aos seres humanos, e não é diferente para os sistemas de gestão urbana, os quais devem garantir o atendimento e a resiliência às demandas futuras (SORIANO et al., 2016; SANTOS; FARIAS, 2017). Desse modo, vê-se a união de modelos da gestão com tecnologias que têm fundamento em adaptabilidade, resiliência, baixo impacto e sustentabilidade, com o exemplo de LID, SUDS, BMP, entre outras alternativas (FLETCHER *et al.*, 2015). A possibilidade de otimizar as cidades, com menor consumo de materiais e maior eficiência ambiental, social e econômica, torna-se assunto de alto interesse e demanda popular.

Outro tópico de interesse é o de realizar escolhas com a maior previsibilidade possível, de modo que as soluções adotadas resultem em reais benefícios aos usuários, bem como atendimento das demandas futuras. Para atender esse objetivo, é fundamental a avaliação do escopo dos sistemas com vista às inúmeras fases do ciclo de vida, bem como uma avaliação sistematizada que possua as mesmas bases de comparação (REBITZER *et al.*, 2004; ANTUNES *et al.*, 2018). A ACV surge como ferramenta que cumpre com excelência os requisitos de comparabilidade e visão holística, bem como é amplamente difundida e aplicada para sistemas sustentáveis.

Nessa linha de raciocínio, inúmeros estudos têm aplicado a ACV em conjunto com medidas de sustentabilidade urbana (ANTUNES et al., 2020a; MARINOSKI; GHISI, 2019; MARTINS VAZ et al., 2020). Estudos sobre uso racional de água, medidas de drenagem sustentável, certificação ambiental, técnicas mitigatórias às ilhas de calor urbano, entre outros exemplos são constantes na literatura de avaliação da sustentabilidade por meio da ACV. Este estudo busca auxiliar na disseminação do estado da arte da ACV de sistemas sustentáveis, por meio da incorporação dos diversos benefícios propiciados pela adoção de sistemas LID e da integração dos diversos benefícios do manejo sustentável hídrico.

1.2 OBJETIVOS

Nas seções a seguir estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar ambientalmente sistemas de captação de água pluvial por modelos de pavimentos permeáveis e de telhados para uso em universidades.

1.2.2 Objetivos específicos

De modo a atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos para esta pesquisa:

- Comparar os potenciais impactos ambientais relacionados ao sistema de captação de água pluvial por meio de pavimento permeável com asfalto permeável, pavimento permeável com concreto permeável, telhados de fibrocimento e o caso base;
- Obter o potencial de economia de água potável obtido por meio do uso de água pluvial para fins não-potáveis para os seis sistemas de área de captação;
- Estimar as diferenças entre simulações atuais para os seis sistemas propostos e localidades avaliadas, e discutir o impacto das mudanças climáticas nos resultados;
- Avaliar quais fases do ciclo de vida dos sistemas são mais impactantes ambientalmente e discutir potenciais melhorias para os sistemas propostos;
- Avaliar os potenciais impactos ambientais da fase de uso e mitigações fornecidas pelo pavimento permeável, como redução das ilhas de calor urbano e melhoria da qualidade da água destinada à rede pública de drenagem.

1.2.3 Estrutura do trabalho

A dissertação está dividida em cinco capítulos, com os nomes de introdução, revisão bibliográfica, método, resultados e discussões e conclusões. Na introdução foi apresentado um panorama geral do assunto, bem como as justificativas e objetivos do trabalho. Na revisão bibliográfica são apresentados, com maiores detalhes, trabalhos similares ao realizado e seus resultados. No método são apresentados os procedimentos definidos para execução do trabalho, bem como as limitações e definições estabelecidas. Em resultados e discussões são comentados os principais resultados obtidos e discutidas as respostas em relação aos problemas da pesquisa. Por fim, em conclusões são resumidos os principais pontos compreendidos, bem como as limitações da pesquisa e sugeridos trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo de revisão bibliográfica apresenta os principais conceitos necessários para compreensão da dissertação e estudos similares. A divisão foi realizada nas três seções de: mudanças climáticas e resiliência urbana; sustentabilidade urbana; e avaliação de ciclo de vida. Por fim, são inseridas as considerações finais.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E RESILIÊNCIA URBANA

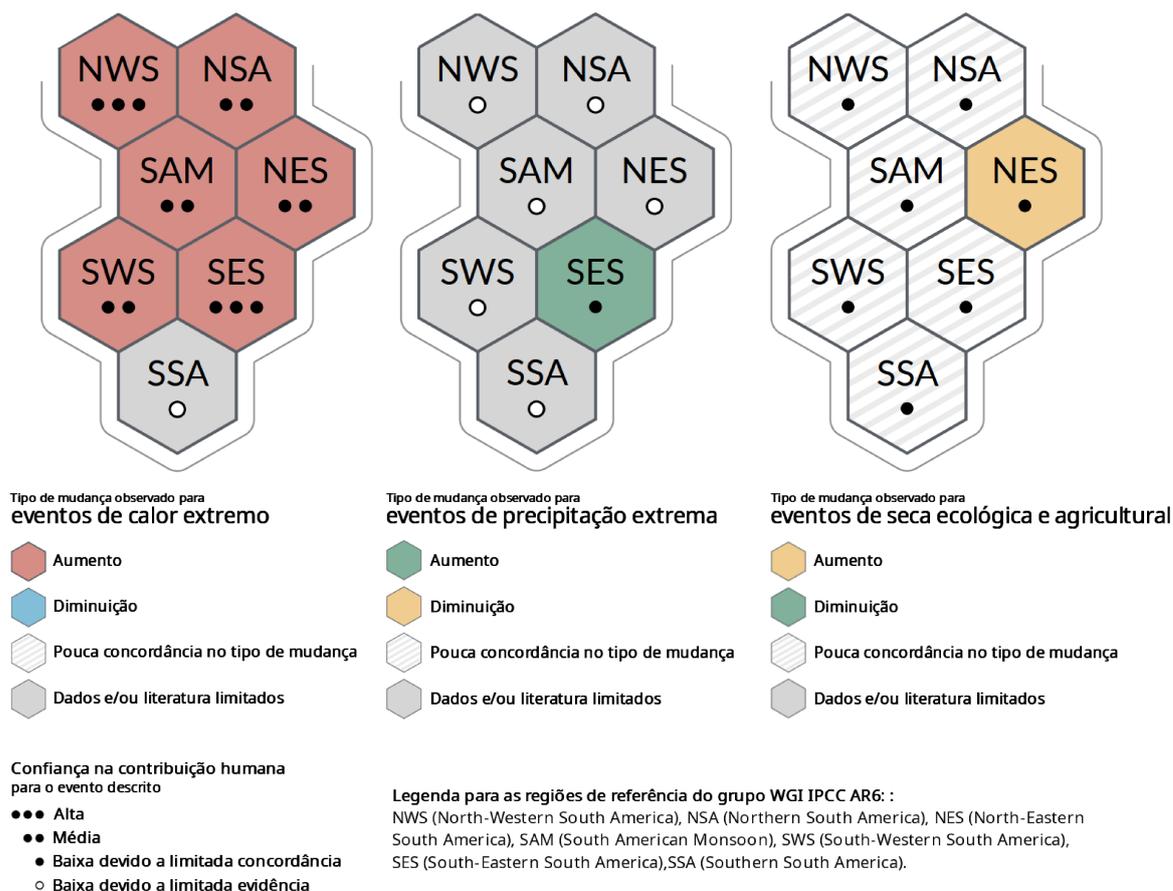
As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios do século XXI para os seres humanos, com variados tipos de problemas em diversos países. Por exemplo, inúmeros autores indicam o aumento da temperatura média e mudanças na distribuição diária de temperatura do ar (MARENGO *et al.*, 2009; IPCC, 2021), mudanças nos padrões pluviométricos e aumento da frequência de precipitações extremas (ZILLI *et al.*, 2017; MARENGO *et al.*, 2009; IPCC, 2021), aumento da probabilidade de incêndios florestais (SILVA *et al.*, 2019; FONSECA *et al.*, 2019), aumento do nível do mar (ALMEIDA *et al.*, 2016), entre outros efeitos climáticos que preocupam a sociedade e o meio urbano. Dentre as grandes dificuldades dos gestores públicos, neste século, está a obtenção de cidades resilientes e capazes de mitigar os efeitos das mudanças climáticas já existentes e das futuras condições de vida.

Desde 1988, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês) produz relatórios sobre as mudanças climáticas no mundo e é responsável por concentrar os avanços científicos no tema. Desde a fundação, o painel foi responsável pelo lançamento de cinco principais avaliações, as quais abordam as mudanças climáticas, o impacto das mudanças em relação aos seres humanos e ao meio ambiente, e medidas mitigatórias de modo a reduzir os impactos futuros e os efeitos dos impactos existentes (IPCC, 2021). Em 2021, o IPCC lançou o primeiro dos documentos da sexta rodada de avaliações das mudanças climáticas, no qual indica expressamente que a influência antrópica é responsável por parte do aquecimento global de modo rápido e amplo. Dentre os consensos obtidos para a influência no clima atual, o relatório indica o aumento da temperatura na superfície terrestre, o aumento da precipitação global sobre a terra, o aumento do nível do mar, a acidificação e aquecimento dos oceanos, o aumento da frequência de eventos de calor extremo e de precipitação extrema, o aumento de secas ecológicas, entre outros efeitos secundários (IPCC, 2021).

Outro tópico importante é a confiabilidade dos resultados, devido à natureza de variabilidade dos fenômenos climatológicos. O relatório "The Physical Science Basis" do IPCC (2021) indica as probabilidades de correlação dos efeitos citados com a influência antrópica, sendo expressiva em quase todos os aumentos observados. Para os três principais efeitos estudados - aumento da frequência de eventos de calor extremo, de precipitação extrema e de secas - o relatório do IPCC apresenta a distri-

buição de aumento ou redução de acordo com a região do globo. A Figura 1 mostra os efeitos encontrados pelo IPCC para eventos de calor extremo, precipitação extrema e seca para a América do Sul, acompanhado da confiabilidade sobre a influência antrópica nos resultados (IPCC, 2021).

Figura 1 – Mudança regional nos padrões de ocorrência de calor extremo, precipitação extrema e seca na América do Sul.



Fonte: Adaptado de IPCC (2021)

Desse modo, interessa-se compreender como projetar os centros urbanos de modo a mitigar os efeitos adversos que possuem tendência de crescimento durante o século XXI. Devido à natureza dos efeitos citados, é compreensível que os dois principais fatores a serem avaliados para os centros urbanos sejam temperatura e precipitação, devido às mudanças observadas e esperadas. Em relação à temperatura busca-se adaptar as cidades de modo a diminuir a temperatura de superfície e a oscilação diária, fatores que podem gerar impacto na saúde e mortalidade dos usuários (GASPARRINI *et al.*, 2017; ORIMOLOYE *et al.*, 2019; HEROLD *et al.*, 2018). Em relação à precipitação, busca-se projetar os sistemas de drenagem de modo a melhor responder às precipitações extremas (WILBY; KEENAN, 2012; MARK *et al.*, 2018),

bem como adaptar os sistemas hídricos de modo a consumir menos água e melhorar a resiliência dos centros urbanos quanto às secas e escassez hídrica (GOSLING; ARNELL, 2016; SCHEWE *et al.*, 2014). Por fim, também existem estudos que avaliam os riscos das cidades litorâneas em relação ao aumento do nível do mar (ALMEIDA *et al.*, 2016).

2.1.1 Aumento de temperatura do ar e ilhas de calor urbano

O aumento de temperatura do ar e da oscilação diária de temperatura, por exemplo, podem ser atribuídos como influência na taxa de mortalidade (GUO *et al.*, 2016; BELL *et al.*, 2008), fator que aumenta a importância de projetar os centros urbanos de modo a mitigar as mudanças climáticas. Bell *et al.* (2008), por exemplo, avaliaram três cidades da América Latina e concluíram que o risco de mortalidade pode ser associado à alta temperatura. Os autores também concluem que a influência da taxa de mortalidade é mais impactante para a população idosa, da qual deve-se prover foco na adaptação urbana. Marengo *et al.* (2009) avaliaram as mudanças climáticas futuras para a América Latina e concluíram, entre as observações realizadas, com o aumento da frequência de noites quentes e mudança nos padrões pluviométricos dependendo da região avaliada. Gasparrini *et al.* (2017) avaliaram projeções de índice de mortalidade para diversos países em cenários futuros de elevada temperatura do ar ocasionada por mudanças climáticas. Os autores concluíram que as mudanças climáticas podem influir em aumento da taxa de mortalidade em todo o planeta, com ação de grande impacto em países mais quentes e com menor desenvolvimento econômico.

Os efeitos negativos do aumento da temperatura global são também amplificados quando combinados com os efeitos das ilhas de calor urbano e do aumento da densificação e urbanização das cidades. Mendes *et al.* (2020) comentam sobre a necessidade de incluir os aspectos climáticos no plano diretor das cidades, o que não é observado nas cidades latino-americanas. Os autores avaliaram os efeitos climáticos da urbanização na cidade de Santiago de Chile, e concluíram que os modelos atuais de densificação contribuíram para a criação de zonas mortas, sem ventos, com diminuição dos ventos refrescantes. Ou seja, a não incorporação da climatologia no planejamento urbano das cidades pode ser fator de impacto nas futuras temperaturas máximas e conforto do usuário, sendo necessário incorporar o quanto antes medidas que mitiguem as ilhas de calor urbano.

O conceito de ilhas de calor urbano é bastante difundido na literatura e explorado por diversos pesquisadores em diversas regiões do globo (MENDES *et al.*, 2020; PERES *et al.*, 2018; KOLOKOTRONI; GIRIDHARAN, 2008). Tem-se como definição do termo o aumento de temperatura do ar dos centros urbanos em relação às áreas suburbanas adjacentes. Balbo (2020) comenta também que existem três principais tipos de ilhas: superficial, atmosférica de marquise e atmosférica de contorno. Dentre as causas

comuns para o efeito, o autor comenta sobre a falta de vegetação, a alta absorção solar devido ao baixo albedo, os impedimentos de fluxo de ar, a alta quantidade de calor humano, a geração elevada de CO₂, entre outros fatores influentes. Peng *et al.* (2012) avaliaram a existência de ilhas de calor urbano em 419 cidades com a inclusão de 18 cidades brasileiras. Percebe-se haver aumentos de temperatura do ar em todas as cidades brasileiras avaliadas, com São Paulo (superior a 5°C) como exemplo de cidade com grande diferença de temperatura do ar da região urbanizada em relação à área sub-urbana.

Desse modo, interessa-se adotar medidas estruturais que auxiliem no combate das ilhas de calor urbano, como o uso de parques, ruas com vegetação, pavimentos permeáveis, telhados verdes, entre outras possibilidades (SANTAMOURIS, 2013; BALBO, 2020; ROWE; GETTER, 2006), bem como incorporar a climatologia nos planos diretores. Muitas das tecnologias citadas podem também ser incorporadas conjuntamente com medidas hídricas de modo a melhor atender às precipitações extremas. Tem-se como exemplo o uso de pavimentos permeáveis que pode auxiliar à drenagem sustentável e à escassez hídrica em eventos de seca, por meio de captação e reúso de água pluvial. Compreende-se assim que os efeitos das mudanças climáticas são evidentes e bastantes documentados, estabelecendo um problema a ser enfrentado nos centros urbanos durante o século XXI.

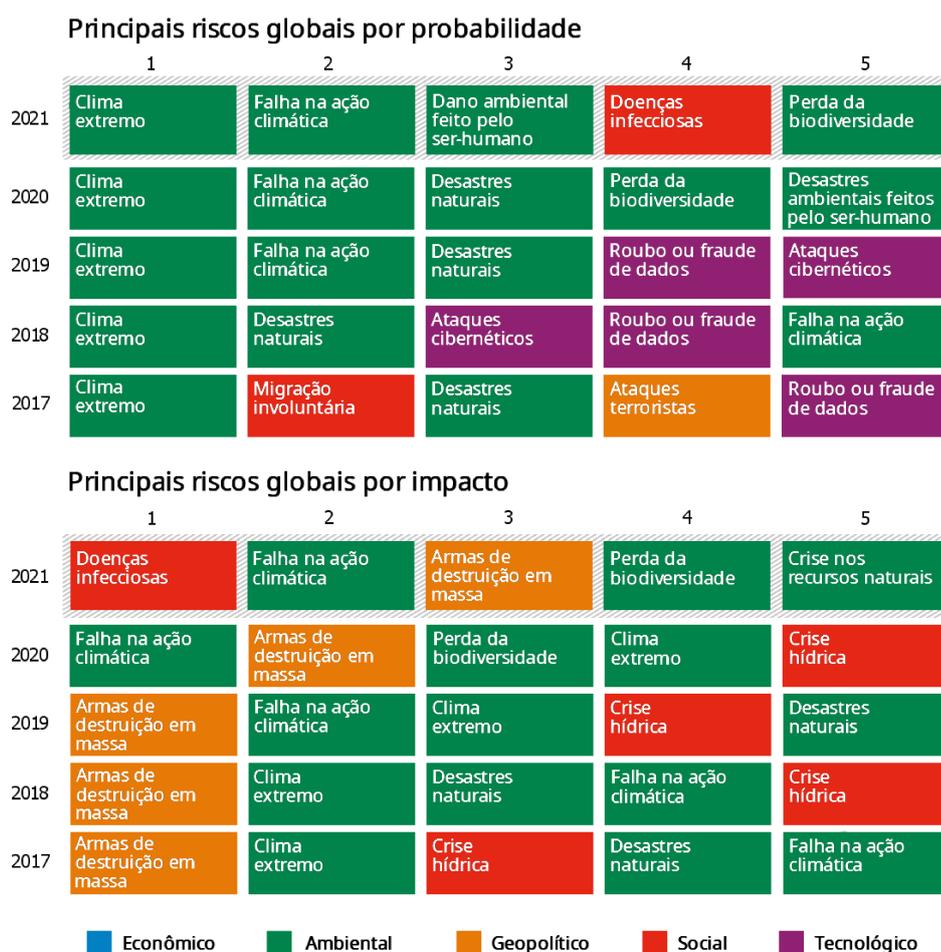
2.1.2 Escassez hídrica

Conforme citado pelo IPCC (2021) e congruente às mudanças climáticas, a escassez hídrica é um problema que assola diversos países do mundo e possui tendência de crescimento (GOSLING; ARNELL, 2016; MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016). De acordo com Mekonnen e Hoekstra (2016), cerca de dois terços da população mundial estão em regiões nas quais há a possibilidade de escassez hídrica severa em pelo menos um mês do ano, o que equivale a 4 bilhões de pessoas. Os autores comentam que muitos estudos não consideram a variação intra-anual de demanda e disponibilidade hídricas, com a obtenção de resultados mais otimistas e não condizentes com a realidade. O aumento populacional e consequente aumento da demanda de água é motivo de preocupação mundial, com o crescente incentivo para aplicação de sustentabilidade no uso de água e avaliação de pegada hídrica dos sistemas produtivos.

De acordo com o 16º relatório de riscos globais do Fórum Econômico Mundial (WEF, 2021), os três primeiros riscos globais elencados por probabilidade de ocorrer são: clima extremo, falha no combate às mudanças climáticas e dano antrópico ao meio ambiente. Entre 2012 e 2020, o WEF elencou crise hídrica como um dos cinco maiores riscos globais em relação ao impacto agregado, e em 2021 elencou como quinto maior risco a crise de recursos naturais, a qual engloba água. Ou seja, sabe-se muito bem dos riscos mundiais de mau uso e gestão dos recursos hídricos, e se requer

cada vez mais a adoção de técnicas sustentáveis que diminuam a probabilidade e o impacto da escassez hídrica. A Figura 2 mostra a evolução dos principais riscos mundiais nos últimos cinco anos, elencados por probabilidade e por impacto, de acordo com o Fórum Econômico Mundial.

Figura 2 – Principais riscos enfrentados pela humanidade.



Fonte: Adaptado de World Economic Forum (2021)

Gosling e Arnell (2016) avaliaram os impactos da mudança climática na escassez hídrica mundial e concluíram que até 2050 o número de indivíduos que moram em regiões passíveis de escassez hídrica irá aumentar, podendo chegar a 4,3 bilhões de pessoas. Os autores também comentam sobre as diferenças regionais da escassez hídrica, das quais percebe-se que o Brasil está no grupo dos países menos afetados. Segundo a estimativa dos autores, e utilizando o *Water Crowding Index (WCI)*, o Brasil não apresentará população em situação de extrema escassez, identificada como menos de 1000 m³/capita/ano. Como comparação, para o oeste da Europa é estimado pelos autores que o percentual de população sob a situação de escassez extrema aumente de 29% para 38% entre 2020 e 2050.

O percentual obtido por Gosling e Arnell (2016) refere-se ao valor de extrema escassez, porém sabe-se que a baixa disponibilidade pode fornecer variações sazonais com escassez momentânea e racionamento necessário. Enedir Ghisi *et al.* (2006), por exemplo, estimam que em 2100 a disponibilidade hídrica no estado de Santa Catarina será de 2000 m³/capita/dia, classificada como muito baixa, de acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*UNEP*, em inglês).

Porém, apesar da abundância hídrica no Brasil e indicadores de escassez mais otimistas em comparação às outras regiões do mundo, a escassez hídrica ainda é observada em diversas localidades do país. Como exemplo, entre 2013 e 2014 São Paulo sofreu uma crise hídrica histórica, a qual levou seus gestores a adotarem técnicas de racionamento hídrico e diminuição de pressão da rede de abastecimento (SORIANO *et al.*, 2016). Targa e Batista (2015) comentam os legados da crise hídrica de São Paulo, com respostas sobre a necessidade de reavaliar a gestão hídrica do país. Deve-se também incentivar a nível governamental e individual ações que promovam o uso racional de água e preservação da amazônia e dos rios brasileiros, de modo a garantir a sustentabilidade dos mananciais.

Tem-se um problema muito grave de distribuição e gestão hídrica no país, devido à própria extensão continental. De acordo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020), em 2019 o índice médio de perdas na distribuição hídrica foi de 39,2%. O índice refere-se a possíveis vazamentos, ligações clandestinas e falhas na medição. Desse modo, demonstra-se a dificuldade de distribuir água no país, seja por uso inadequado da população (ligação clandestina), falha de comissionamento (falha na medição) ou dificuldades de manter a rede de distribuição efetiva (vazamentos). O cenário torna-se mais impactante uma vez que a escassez hídrica é realidade nacional. O diagnóstico de serviços de água e esgoto do SNIS também comenta que países como Japão, Austrália e Nova Zelândia apresentam perdas bastantes inferiores às perdas encontradas no Brasil (SNIS, 2020).

Por fim, outra abordagem interessante é a de tratar água como *commodity*. Do Carmo *et al.* (2007) comentam sobre a possibilidade de endereçar em políticas públicas o uso de água virtual, similarmente à pegada hídrica. A água virtual, ou pegada hídrica, é um conceito que denota a quantidade de água que está presente em um determinado produto, e serve para quantificar as demandas hídricas e auxiliar na gestão da escassez e valoração econômica da água. É importante notar que o Brasil é exportador de diversos produtos agrícolas que demandam grande quantidade de água, e, de certa forma, tal exportação representa a transferência direta de água para outros países. Questionamentos como a dieta de grandes populações, as relações econômicas em torno da água e o direito sobre a água intra e internacional são constantemente enaltecidos, principalmente com o avanço das mudanças climáticas e as dificuldades de garantir constância pluviométrica.

Ou seja, a água é um recurso finito e de difícil gestão. Seja por mudanças climáticas, dificuldades de distribuição ou aumento de demanda, o Brasil e demais países devem procurar obter sustentabilidade nos modelos de fornecimento hídrico.

2.1.3 Mudanças pluviométricas

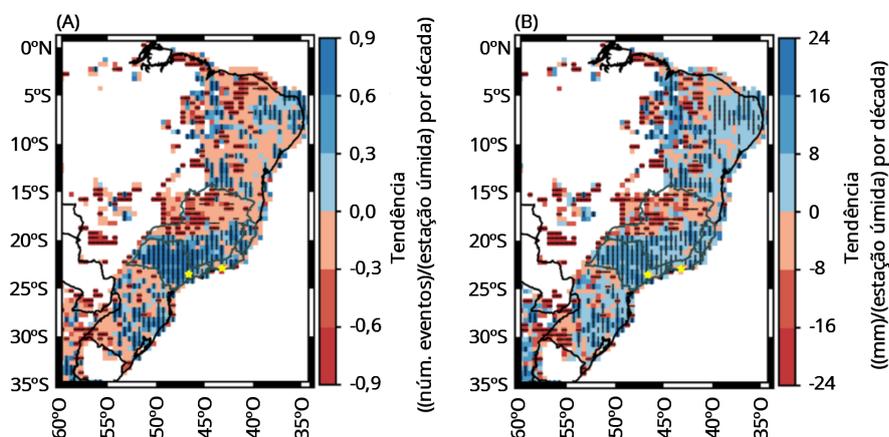
Conforme citado no relatório "The Physical Science Basis" do IPCC (2021), as mudanças pluviométricas são realidade em diversas regiões do globo. A precipitação média sobre a porção terrestre do globo provavelmente¹ aumentou desde 1950, com maior incremento a partir de 1980. A frequência e intensidade das precipitações extremas também aumentou desde 1950, e a ação antrópica é provavelmente¹ o principal motivo (IPCC, 2021). É esperado que os eventos de precipitação extrema sejam mais intensos e frequentes na maior parte do globo durante o século XXI, com aumento de intensidade de 7% para cada 1°C de aquecimento global. Outro tópico importante é a variação do volume precipitado, que será maior entre as estações (alta confiança) e entre anos (média confiança) (IPCC, 2021).

No Brasil, alguns estudos avaliaram as mudanças pluviométricas regionais de modo a compreender os efeitos adversos da precipitação futura sobre as cidades. Zilli *et al.* (2017) avaliaram as tendências de precipitação extrema em regiões do sudeste brasileiro. Os autores citam que estudos realizados no sudeste da América do sul concordam no aumento de dias consecutivos secos e diminuição no número de dias com precipitação leve, bem como aumento no número de dias de precipitação extrema. Para as três regiões avaliadas pelos autores (Rio de Janeiro e Espírito Santo, São Paulo e Região Metropolitana de São Paulo) o número de eventos de precipitação extrema e a intensidade da precipitação extrema aumentaram. Os autores também concluíram que, para algumas das regiões, as precipitações leves diminuíram.

Os dados utilizados por Zilli *et al.* (2017) são compreendidos entre 1938 e 2012, representando assim a tendência de mudança nos últimos 74 anos. A Figura 3 mostra os resultados obtidos por Zilli *et al.* (2017) para tendências de eventos extremos de precipitação em parte do Brasil. Zandonadi *et al.* (2016) realizaram pesquisa similar e obtiveram tendências positivas e negativas para a bacia hidrográfica do rio Paraná. Os autores também comentam que cidades como Curitiba e Goiânia apresentaram tendência de aumento de precipitações extremas, o que é alarmante, uma vez que os eventos extremos ocorridos nos últimos anos já ocasionaram danos. Marengo *et al.* (2013) também obtiveram resultados similares para a região metropolitana de São Paulo, com a tendência de aumento de intensidade e frequência de eventos de precipitação extrema e diminuição do número de eventos de precipitação leve.

¹ Uso da expressão *likely* no relatório do IPCC (2021) refere-se a probabilidade entre 66 e 100%.

Figura 3 – Tendência de mudança climática no número de eventos extremos (A) e na intensidade de eventos extremos (B) na região sudeste e nordeste do Brasil.



Fonte: Adaptado de Zilli *et al.* (2017)

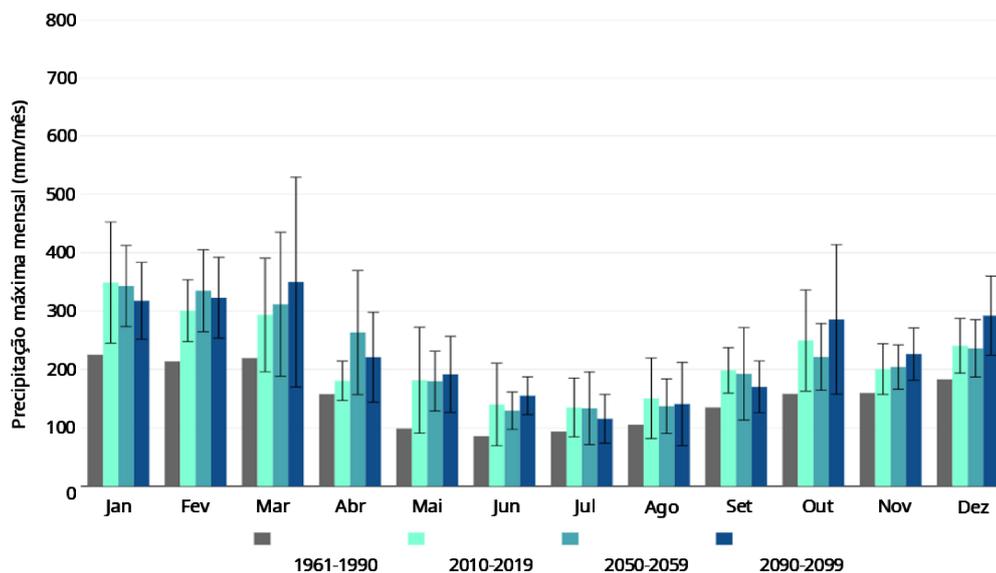
De modo geral, percebe-se que os trabalhos encontrados para o Brasil concordam com o aumento do número de eventos de precipitação extrema e da intensidade dos mesmos. Porém, é fundamental a avaliação regional para compreender os efeitos locais que influenciam nas mudanças climáticas. Gotardo *et al.* (2018), por exemplo, avaliaram a precipitação no estado de Santa Catarina e concluíram que sete das oito meso-regiões avaliadas apresentaram aumento na precipitação anual. Marengo (2014) comenta sobre as incertezas das mudanças climáticas em relação à pluviometria, com diferentes projeções (diminuição, constância ou aumento) para diferentes regiões do Brasil. Porém, o autor também comenta que existe média confiabilidade sobre o aumento de precipitação extrema nas regiões sul, sudeste, centro-oeste e no oeste da Amazônia.

No Brasil, também foi lançada a iniciativa AdaptaClima, coordenada e operada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). O objetivo da iniciativa do governo é de criar uma plataforma de conhecimento em adaptação à mudança do clima por meio de mapas interativo, biblioteca de tecnologias de adaptação e conhecimentos sobre as mudanças climáticas. Dentre os materiais fornecidos na biblioteca de conteúdos, o AdaptaClima apresenta o trabalho de Santos (2018) com a entrega do MudançasClimáticasBrasil¹. O projeto consta de um mapa interativo que mostra aproximadamente 670 municípios brasileiros, com os respectivos dados de temperatura do ar e precipitação média mensal e um modelo de projeção climática dos dados para o futuro. A Figura 4 mostra como exemplo a projeção da precipitação máxima mensal para as décadas futuras no século XXI em Florianópolis, de acordo com o MudançasClimáticasBrasil. A Figura 5 mostra os mesmos resultados para a cidade de Curitiba. Ambos os resultados usam o Representative Concentration Pathway (RCP) de 8.5, considerado como a

¹ <https://mudancasclimaticasbrasil.com/>

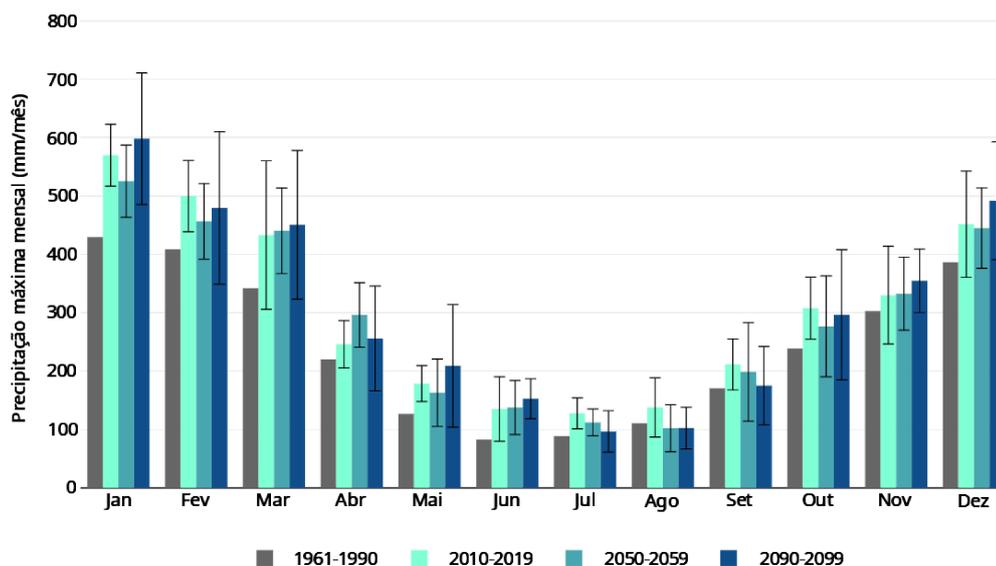
projeção para "business as usual". As linhas sobre as barras indicam a variabilidade atrelada ao modelo de projeção.

Figura 4 – Projeção da precipitação máxima mensal em Florianópolis (SC) no século XXI para o RCP de 8.5.



Fonte: Adaptado de Santos (2018)

Figura 5 – Projeção da precipitação máxima mensal em Curitiba (PR) no século XXI para o RCP de 8.5.



Fonte: Adaptado de Santos (2018)

2.1.4 Modelos climáticos futuros

Carvalho *et al.* (2020) realizaram a avaliação de diferentes tamanhos de cisternas de água pluvial como medida para redução do escoamento superficial e controle das águas pluviais urbanas. O objetivo dos autores foi de avaliar os efeitos das mudanças climáticas nas modelagens por meio da consideração de diferentes RCP, ou seja, diferentes padrões de concentração de carbono no planeta durante o século XXI. Como conclusões os autores obtiveram que as mudanças climáticas aumentarão o escoamento superficial do centro urbano de Fortaleza, e o uso de cisternas e de captação de água pluvial podem ser mais uma ferramenta para o aumento da vida útil dos sistemas de drenagem, bem como fornecer água para usos não-potáveis.

De acordo com Thomson *et al.* (2011), os RCPs representam a força radiativa de saída do planeta, estabilizada no ano 2100. Como exemplo, o RCP 4,5 representa 4,5 W/m² de força radioativa. O mesmo se estabelece para o RCP 8,5, com 8,5 W/m². A definição de cenários de concentração de gases de efeito estufa e de mudanças climáticas é fundamental para a análise de sensibilidade e para a adoção de políticas públicas que intervenham em prol da qualidade de vida. Desse modo, pesquisadores e tomadores de decisão podem prever e agir sobre a adoção de tecnologias, taxas de carbono e políticas para auxiliar no controle e mitigação das mudanças climáticas.

Outros trabalhos também realizaram análises similares com o objetivo de analisar os impactos das mudanças climáticas na captação de água pluvial. Almazroui *et al.* (2017), por exemplo, avaliaram sistemas de captação de água pluvial na Arábia Saudita em dois diferentes RCPs, 4,5 e 8,5. Como resultado os autores obtiveram que são esperados períodos de chuva mais extensos, os quais correspondem a oportunidades para captação e uso da água pluvial. Zhang *et al.* (2019) avaliaram os impactos das mudanças climáticas em sistemas de captação de água pluvial na China, principalmente relacionados à disponibilização de água e a eficiência de captação do escoamento superficial da água. Os modelos futuros utilizados pelos autores foram produzidos por meio da técnica de *downscaling* pelo modelo CLIGEN. Cita-se também que a mudança climática na região culminou em maior volume anual de precipitação e consequentemente maiores indicadores de eficiência de economia de água e confiabilidade do sistema.

Por fim, Haque *et al.* (2016) também avaliaram os impactos das mudanças climáticas em um sistema residencial de captação de água pluvial na Austrália. Diferentemente de Zhang *et al.* (2019), os autores obtiveram como resultado uma influência negativa no desempenho do sistema com a mudança climática. Os dados climáticos futuros dos autores foram realizados por meio do projeto NARClIM, com *downscaling* realizado por meio do modelo climático global CSIRO Mk.3. O modelo climático futuro obteve como resultados a diminuição do volume anual precipitado, aumento da precipitação no período úmido e diminuição no período seco, com consequente aumento da

sazonalidade e diminuição da constância pluviométrica.

2.2 SUSTENTABILIDADE URBANA

Interessa-se, portanto, projetar infraestruturas melhor adaptadas ao meio ambiente, dadas as complexidades presentes e futuras das cidades. Para a problemática de temperatura do ar e das ilhas de calor urbano pode-se pensar em meios de arborizar o meio ambiente, aumentar o albedo das estruturas, promover corredores de ventilação nas cidades e uso de água para resfriamento evaporativo (BALBO, 2020; SANTAMOURIS *et al.*, 2017). Em relação à precipitação, duas adaptações podem ser realizadas. Por um lado, deve-se obter sistemas de fornecimento hídrico mais resilientes às possíveis secas e dificuldades de abastecimento (KINGSBOROUGH *et al.*, 2016; KOOP; LEEUWEN, 2017). Por outro, deve-se obter sistemas de drenagem resilientes e sustentáveis, que melhor se adaptem às mudanças climáticas (SEMADENI-DAVIES *et al.*, 2008; ZHOU, 2014; JUNG *et al.*, 2015).

2.2.1 Estratégias urbanas para ilhas de calor urbano e calor extremo

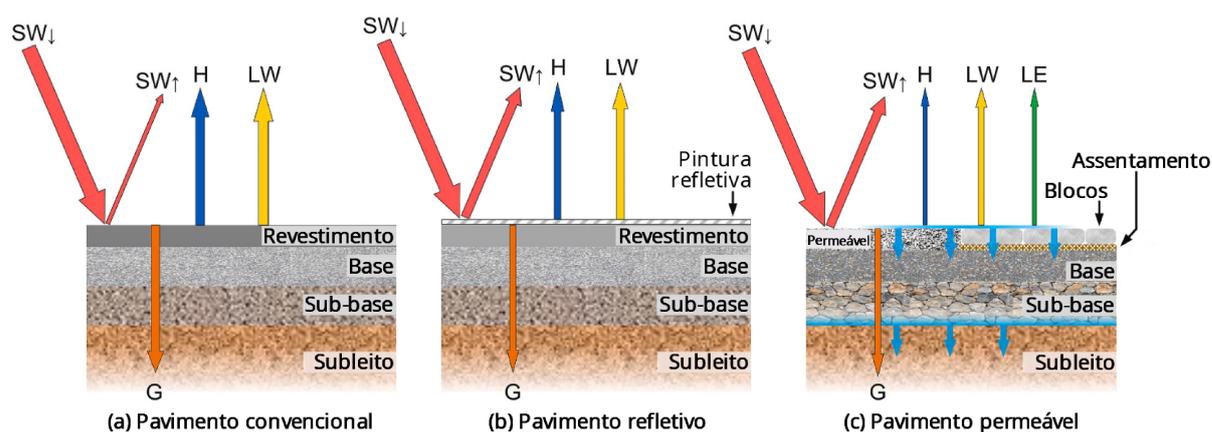
Balbo (2020) comenta sobre as possibilidades de atenuação das ilhas de calor urbano por meio da expansão das áreas urbanas verdes, com a inserção de parques e lâminas d'água, do aumento do albedo dos materiais de pavimentação e telhados e do uso de pavimentos permeáveis. Taleghani e Berardi (2018) avaliaram o conforto térmico de pedestres em região urbana da cidade de Toronto, Canadá, por meio de simulação computacional. Como resultado os autores obtiveram que o aumento de albedo da pavimentação de uma praça de 0,1 para 0,5 gerou o efeito de resfriamento de até 1°C na temperatura do ar, bem como o uso de uma lagoa artificial gerou o resfriamento de 0,5°C. Porém, somente o resfriamento via lagoa artificial foi capaz de melhorar o conforto dos usuários, uma vez que o aumento do albedo da praça também aumentou a temperatura radiante média com consequente aumento da Temperatura Equivalente Fisiológica (PET). Ou seja, os autores discutem que estratégias com uso de corpos hídricos, borrifo de água e evaporação podem ser benéficas ao combate das ICU.

Akbari *et al.* (2016), por exemplo, avaliaram o estado da arte de medidas de mitigação das ICU. Dentre as tecnologias citadas pelos autores tem-se o uso de telhados e pavimentos refletivos, pavimentos permeáveis, uso de materiais de mudança de fase, sistemas de recirculação de água e evapotranspiração, sombreamento de locais com alta absorvância, uso de praças e árvores, trocadores de calor, telhados verdes, entre outras. Os autores comentam como principais características para as cidades, o uso de materiais de alto albedo, diminuindo a temperatura superficial, bem como o uso da água e sua alta inércia térmica e alto calor específico (AKBARI *et al.*,

2016). Os autores também concluem que a mitigação das ilhas de calor urbano traz outros benefícios como redução da energia consumida para resfriamento dentro das edificações, melhora a qualidade do ar urbano e as condições do ambiente urbano.

Wang *et al.* (2021) realizaram uma revisão sintética sobre o uso de pavimentos frios (*cool pavements*, em inglês) como medida de mitigação das ICU. Os autores comentam sobre a existência de três principais tipos de pavimentos frios, sendo pavimentos permeáveis, pavimentos refletivos e pavimentos de alta inércia térmica. Os dois primeiros são mais usuais e comumente utilizados. Os autores também comentam das diferenças entre os tipos de materiais durante a vida útil, como asfalto e concreto, e o efeito da escolha do material no albedo. A Figura 6, apresentada por Wang *et al.* (2021), mostra dois tipos de pavimentos frios e a comparação dos fluxos de calor em relação ao modelo convencional de pavimentação.

Figura 6 – Tipos de pavimentos frios usados na mitigação de ilhas de calor urbano.



Fonte: Traduzido de Wang *et al.* (2021)

Onde: SW_{\downarrow} é a radiação incidente de onda curta, SW_{\uparrow} é a radiação refletida de onda curta, LW é a radiação de onda longa, G é a condução de calor, H é o fluxo de calor sensível e LE é o fluxo de calor latente.

A definição do albedo dos pavimentos faz-se muito importante, uma vez que rege os processos termodinâmicos responsáveis pelas trocas de calor, conforme mostra a Figura 6. Alleman e Heitzman (2019) realizaram a quantificação do albedo de diversas estruturas de pavimentos de concreto e asfalto, bem como a avaliação da variação do parâmetro com o envelhecimento. Entre as conclusões os autores comentam que o albedo inicial de pavimentos de concreto (entre 0,25 e 0,40) é bastante superior ao de asfalto (entre 0,05 e 0,20). Porém, também comentam que o envelhecimento gera o aumento do albedo das superfícies asfálticas e a diminuição das superfícies de concreto, devendo-se atentar aos diferentes parâmetros influentes na variação do albedo durante a vida útil. Balbo (2020) também comenta sobre a possibilidade do concreto apresentar albedo superior ao de superfícies asfálticas e auxiliar na mitiga-

ção das ilhas de calor urbano por meio da maior reflexão da radiação solar. Deve-se, porém, atentar às características microclimáticas e a influência no conforto térmico do usuário, conforme concluído por Taleghani e Berardi (2018).

2.2.2 Estratégias urbanas para escassez hídrica

Diversos autores e pesquisas avaliaram durante o século XXI estratégias focadas na adaptação das cidades para obter resiliência urbana hídrica. Kingsborough *et al.* (2016), por exemplo, avaliaram diferentes estratégias para a adaptação da cidade de Londres em relação aos recursos hídricos futuros. Os autores avaliaram diferentes cenários futuros considerando padrões de investimento, crescimento populacional, demanda hídrica diária, entre outros parâmetros. Os custos atrelados às definições de medidas de gestão hídrica também foram incorporados na análise. Como conclusão os autores comentam que cidades como Londres dependem da capacidade de serem eficientes e de baixo risco, com a necessidade de apresentar estratégias para resolução de riscos climáticos futuros, com o exemplo da escassez hídrica.

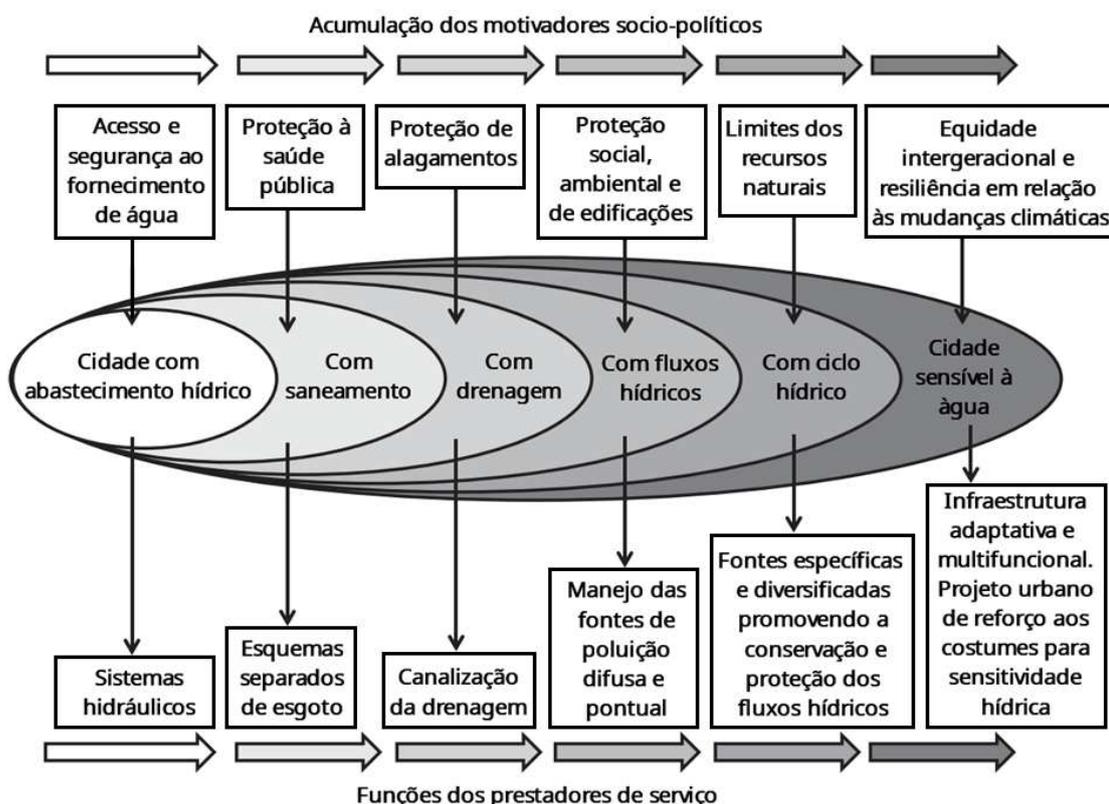
Koop e Leeuwen (2017) comentam que o custo de não agir em relação à urbanização, às mudanças climáticas e às dificuldades de manejo hídrico pode inferir alto custo sobre os centros urbanos. Os autores comentam também sobre o crescimento populacional mundial, com alta dependência na região global de análise, e a constante urbanização, em países desenvolvidos ou em desenvolvimento. Ambas as tendências podem dificultar o manejo hídrico, uma vez que mudanças climáticas podem resultar em maior quantidade de alagamentos e dificuldade de reservação de água, enquanto o crescimento populacional aumenta a demanda hídrica e a urbanização focaliza essa demanda em regiões específicas.

Leeuwen (2017) realizou uma avaliação do manejo integrado dos recursos hídricos da cidade de Melbourne, na Austrália. Melbourne é um exemplo de gestão hídrica devido às ações tomadas após a crise hídrica que assolou a cidade por 10 anos, influenciando nas ações e medidas estruturais e não-estruturais adotadas pelo governo australiano. De acordo com o autor, 30% das casas de Melbourne utilizavam medidas como a captação e uso de água pluvial em 2015, com planos governamentais para a evolução dessa medida. Outro tópico importante foi a diminuição de 40% na demanda hídrica durante os 10 anos de seca. Ressalta-se também que os autores comentam sobre demais medidas adotadas pelo governo de Melbourne como a preparação de sistemas de dessalinização de modo a evitar a escassez hídrica nas futuras, e já esperadas, secas do local.

Ashley *et al.* (2013) realizaram uma pesquisa sobre a experiência internacional em relação ao Projeto Urbano Sensível à Água (*WSUD*, em inglês). Os autores comentam sobre as dificuldades existentes no Reino Unido para o manejo hídrico holístico, de modo a aplicar o *WSUD* efetivamente. Uma das principais dificuldades está atrelada

com os diferentes agentes envolvidos no processo de regulação e promoção do uso de técnicas sustentáveis, dos quais se requer grande sintonia de modo a tornar as políticas públicas adotadas. A Figura 7 mostra a evolução do conceito de cidade em relação à sensibilidade à água, conforme apresentado por Brown *et al.* (2009).

Figura 7 – Evolução do conceito de cidade sensível à água.



Fonte: Traduzido de Brown *et al.* (2009)

Os autores comentam sobre a visão integrada de fornecimento hídrico durante o controle de alagamentos, uma vez que todo tipo de água oferece oportunidade de uso. Outros tópicos relevantes abordados pelos autores possuem relação com a necessidade de utilizar a água captada o mais localmente possível, evitando longas transposições; habilitar a sinergia com o ambiente construído, de modo a potencializar os processos hídricos naturais; e balancear o excesso e a escassez hídrica com gestão eficiente (ASHLEY *et al.*, 2013). Por fim, concluem sobre a possibilidade de alinhar o planejamento urbano com o manejo hídrico, uma vez que as cidades eco-eficientes possuem a água como recurso de alto interesse. O crescimento em preocupação com o futuro hídrico e as crescentes evidências de mudanças climáticas corroboram para a manutenção de conceitos como *WSUD* em alta demanda no planejamento público.

2.2.3 Estratégias urbanas para precipitação extrema e drenagem ineficiente

Também é de total interesse dos gestores mitigar os danos futuros ocasionados nos centros urbanos devido às precipitações intensas, similarmente à preocupação relacionada à escassez hídrica. Os modelos atuais de drenagem urbana podem se tornar ineficientes devido a diversos fatores que incluem: o mau uso, o acúmulo de detritos, o aumento das áreas impermeabilizadas e escoamento superficial, e o aumento de precipitações extremas devido às mudanças climáticas. O aumento da densificação urbana já produzia um aumento no escoamento superficial e sobrecarga da drenagem existente (TUCCI, 2012), fator que será amplificado com o aumento da frequência e intensidade das precipitações extremas. Outro tópico negativo dos modelos atuais de drenagem é a presença de grandes medidas estruturais, com altos custos de reparo e instalação e baixa flexibilidade (ZHOU, 2014). Cruz e Tucci (2008), por exemplo, comentam a necessidade de agir preventivamente em relação à drenagem urbana, com um custo muito inferior de implantação em relação à utilização de medidas corretivas. Desse modo, modelos de cidades eficientes devem atender às vulnerabilidades da drenagem urbana, por meio de projetos que envolvam o desenvolvimento sustentável da gestão da água pluvial dentro do centro urbano.

Diversos conceitos de desenvolvimento sustentável das cidades podem ser utilizados, e se faz necessário esclarecer as diferenças entre as nomenclaturas. O Quadro 1 mostra as conclusões obtidas por Fletcher *et al.* (2015) dos principais termos relacionados à drenagem urbana. Os autores comentam que a tentativa de obter uma nomenclatura universal é falha, pois os termos utilizados indicam diferentes abordagens e auxiliam na definição dos objetos de análise. Também comentam a existência de características locais de projetos, as quais desempenham importante papel na comunicação. Apesar da drenagem urbana ser muito antiga, recente interesse em abordagens holísticas fez com que diversos termos relacionados à sustentabilidade fossem adotados, fator que demonstra o aumento do número de citações dos termos do Quadro 1 (FLETCHER *et al.*, 2015).

Percebe-se que existe a possibilidade de atuar em escala específica com uso de técnicas estruturais ou não-estruturais, e em escala ampla com filosofia de projeto e planejamento urbano. Também se pode atuar com foco no manejo de água pluvial somente ou com foco em todo o balanço hídrico, de modo a entender as sinergias e complexidades da gestão hídrica. Desse modo, Fletcher *et al.* (2015) realizaram a classificação dos principais termos de acordo com o foco primário e a especificidade de análise. A Figura 8 mostra a classificação dos termos de drenagem urbana.

De modo geral, inúmeros estudos de caso apresentam tentativas de mitigar os efeitos adversos da drenagem convencional por meio de dispositivos de drenagem sustentável. Independente da nomenclatura utilizada, o objetivo é projetar sistemas de drenagem e manejo hídrico que garantam a sustentabilidade, resiliência e adap-

Quadro 1 – Termos relacionados à drenagem urbana sustentável.

Termo	Principais países ¹	Pontos principais
Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID)	EUA, Canadá e Nova Zelândia	Minimizar os custos do manejo de águas pluviais por meio de projetos mais "naturais". Retomar a hidrologia natural (pré-urbanização) e desencorajar soluções de tratamento à jusante.
Desenvolvimento e Projeto Urbano de Baixo Impacto (LIUDD)	Nova Zelândia	Termo similar ao LID com foco principal na prevenção da poluição em contrapartida ao manejo das águas de escoamento. Foco dado ao projeto do meio urbano.
Projeto Urbano Sensível à Água (WSUD)	Austrália (criação do termo), Reino Unido e Nova Zelândia	Manejo do balanço hídrico urbano com melhoria da qualidade da água, se possível. Foco em encorajar conservação hídrica (por captação e reúso, além de uso racional), com oportunidades de conscientização e recreação com água, bem como integração do tratamento da água pluvial com o ambiente.
Manejo Integrado de Águas Urbanas (IUWM)	- ²	Termo mais amplo em relação ao manejo hídrico, com abrangência de todas as partes do balanço hídrico urbano, incluindo naturais ou construídas e superficiais ou profundas. Análise das necessidades qualitativas e quantitativas do homem e do meio-ambiente, bem como avaliação das características ambientais, sociais, culturais e econômicas. Almeja sustentabilidade.
Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS)	Reino Unido	Conjunto de tecnologias e técnicas para drenagem de água pluvial de modo mais sustentável comparado às soluções usuais de drenagem. Objetiva tratar a água pluvial mais "naturalmente", similar ao ciclo hidrológico pré-urbanização. Requisitos quantitativos e qualitativos para projetos expressos.
Melhores Práticas de Manejo (BMP)	EUA e Canadá	Medidas estruturais ou não-estruturais que atuam por meio de prevenção. Atualmente é mais utilizado para a prevenção de poluição e é dividido em quatro subgrupos: dispositivos de retenção, de recarga, práticas caseiras e outros.
Medidas de Controle de Água Pluvial (SCMs)	EUA	Medidas estruturais ou não-estruturais que atuam no controle de águas pluviais. Termo criado para substituir o BMP, uma vez que não incorpora a palavra "melhores", evitando um comparativo, e condiz mais diretamente às águas pluviais.
Técnicas Alternativas (ATs) ou Técnicas Compensatórias (CTs)	Países que falam francês e Brasil	Termo que descreve nova abordagem que difere da tradicional disposição rápida da drenagem urbana. Focada em soluções mais naturais com envolvimento somente de problemas de drenagem e poluição. Como foram utilizadas em cidades que estavam em expansão, também receberam o nome de técnicas compensatórias, em relação à urbanização.
Controle na Fonte	Canadá, Reino Unido e EUA	Usualmente associado ao uso de pequenas aplicações espalhadas de modo a manter as condições de pré-desenvolvimento da bacia hidrográfica. Tratamento o mais próximo possível da fonte de geração da poluição e pode ser utilizado tanto para termos estruturais como não-estruturais.
Infraestrutura Verde (GI)	EUA	Conceito que contempla além da gestão de água pluvial e promove o uso de espaços verdes e ecologia. Objetiva potencializar os serviços do ecossistema e o uso de vegetação e solo para manejo de águas pluviais e melhorias ambientais.
Dispositivos de Melhoria da Qualidade da Água Pluvial (SQIDs)	Austrália	Termo utilizado para projetos com foco em melhoria da qualidade da água pluvial. Possui diminuição do uso, uma vez que os dispositivos que tratam a qualidade também influenciam na quantidade de água avaliada, encaixando-se melhor em algum dos outros termos.
Demais termos	Demais países	Traduções dos termos citados ou termos locais com usos e características específicas. Os termos citados por Fletcher <i>et al.</i> (2015) focam em países de língua inglesa e a homogeneização da linguagem técnica no inglês.

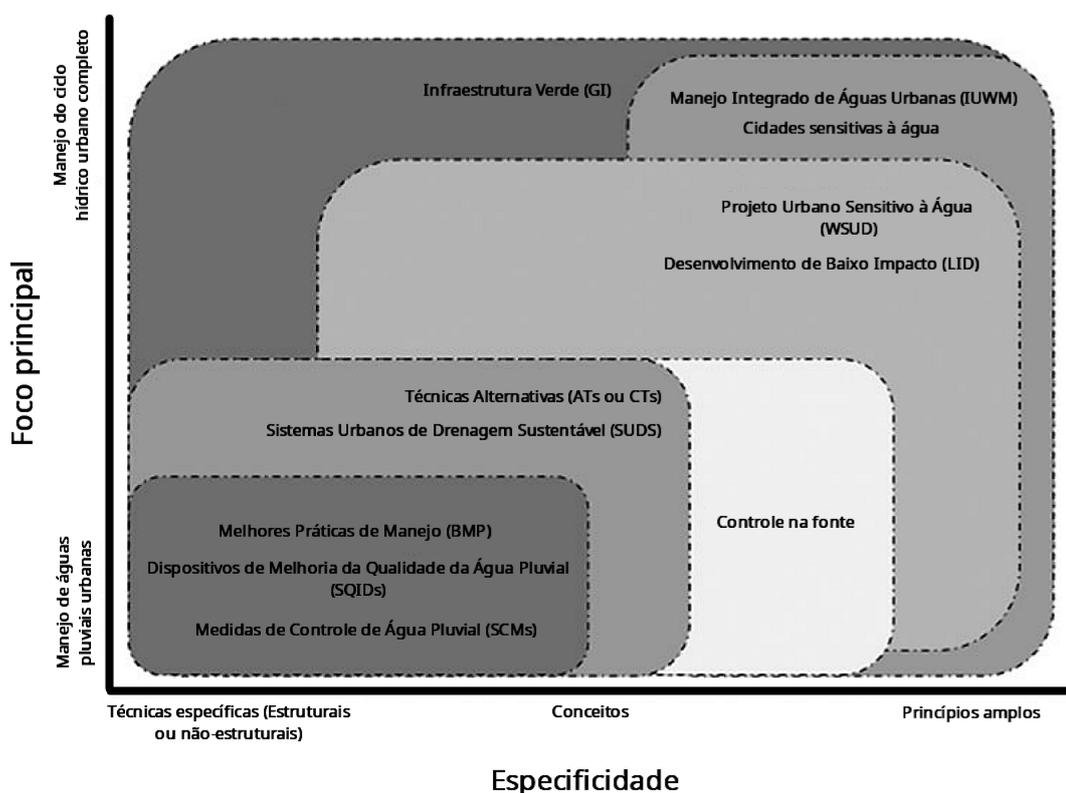
¹ - Países citados por Fletcher *et al.* (2015). Mais países podem utilizar os termos citados.

² - Não foi indicado por Fletcher *et al.* (2015) quais países utilizam este termo.

Fonte: Adaptado de Fletcher *et al.* (2015).

tabilidade. Estudos em países como Itália (PIACENTINI; ROSSETTO, 2020), França (PIACENTINI; ROSSETTO, 2020), Espanha (PERALES-MOMPARLER *et al.*, 2017), Uruguai (VINCENT *et al.*, 2017), Reino Unido (COTTERILL; BRACKEN, 2020) e Brasil (BENINI, 2015; CAUDURO *et al.*, 2019) são exemplos da tentativa de abordar sustentabilidade na prática.

Figura 8 – Classificação dos termos de drenagem urbana quanto ao foco e especificidade.



Fonte: Traduzido de Fletcher *et al.* (2015)

Em relação à aplicabilidade dos sistemas, interessa-se compreender as diferentes tecnologias para os diferentes ambientes propostos. Ou seja, a análise da utilização de técnicas sustentáveis é muito dependente do local de projeto, bem como características sociais, econômicas e até culturais da região. Os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS) abordam mais diretamente as técnicas aplicáveis, estruturais ou não, e os conceitos envolvidos no manejo de águas pluviais urbanas (SRISHANTHA; RATHNAYAKE, 2017). Desse modo, interessa-se avaliar ambientalmente as estratégias pontuais sugeridas pelo conceito.

2.2.4 Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS)

Os SUDS possuem como premissa a diminuição do escoamento superficial e a retomada de condições da bacia hidrográfica pré-urbanização, por meio da utilização de sistemas de drenagem sustentável. As técnicas surgem como evolução do modelo higienista de drenagem urbana, uma vez que se procura compensar e tratar localmente a água pluvial captada, diferindo dos modelos de transposição à jusante (AGOSTINHO; POLETO, 2012). De acordo com Agostinho e Poleto (2012), as estruturas classificadas como SUDS mais usualmente utilizadas são:

- Pavimento permeável ou semipermeável;
- Reservatórios de detenção e retenção;
- Trincheira de infiltração;
- Vala e valeta de infiltração;
- Poço de infiltração;
- Telhado verde;
- Faixas gramadas.

Lourenço (2014) realizou uma revisão bibliográfica acerca dos dispositivos considerados como SUDS e os respectivos dimensionamentos hidrológicos para correto funcionamento. As técnicas avaliadas pela autora são as mesmas citadas por Agostinho e Poleto (2012), concordando com o sistema de classificação e medidas estruturais denominadas SUDS. A autora comenta sobre o potencial dos SUDS de reduzir os riscos de inundação, porém reitera sobre a necessidade de avaliação por especialistas, uma vez que características locais e peculiaridades influenciam na eficiência dos sistemas. A avaliação deve ser realizada por especialistas em hidrologia e hidráulica, bem como a realização de controle e manutenção periódica.

A Associação de Pesquisa e Informação da Indústria da Construção (CIRIA, em inglês) publicou, em 2015, o manual do SUDS, com o intuito de concentrar em um documento as melhores práticas relacionadas às diferentes técnicas classificadas como SUDS. Dentre as características os autores comentam sobre a capacidade dos SUDS contemplarem a resiliência urbana, de modo a mitigar os efeitos da constante urbanização e das mudanças climáticas (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011). Os autores também abordam a necessidade dos SUDS abordarem objetivos atuais e futuros, devendo-se atentar a todos os indivíduos influenciados pela drenagem. Características como o progresso social, uso consciente dos recursos naturais, proteção da natureza e manutenção do crescimento econômico e da geração de emprego são exemplos de objetivos da implantação correta dos SUDS.

Ou seja, por meio da adoção de técnicas sustentáveis pode-se atender os riscos de alagamento, o manejo hídrico correto, a resiliência à mudança climática, a melhor sinergia com o ambiente natural, o respeito à biodiversidade e até a redução de geração de carbono (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011). Todos os benefícios podem ser obtidos desde que atendidos quatro princípios básicos de projeto: análise quantitativa, análise qualitativa, análise da amenidade e análise da biodiversidade. A atenção aos quatro principais princípios do projeto sustentável pelo SUDS é fundamental para que não se percam possíveis benefícios. Demais características fundamentais para a eficiência da sustentabilidade são a capacidade de construção e de manutenção, a relação custo-benefício e a segurança e saúde dos usuários. Percebe-se que a tríade do desenvolvimento sustentável (econômico, ambiental e social) é amplamente avaliada, de modo que haja a correta instalação e funcionamento dos sistemas, por meio da análise holística.

2.2.5 Pavimentos permeáveis

Uma das tecnologias mais utilizadas dentro dos SUDS é a pavimentação permeável. Seu uso é amplamente sugerido para praças, vias públicas de baixo volume de tráfego e calçadas (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011), uma vez que pode servir como estratégia mitigadora para as três problemáticas citadas anteriormente: ICU, controle de alagamentos e combate à escassez hídrica (BALBO, 2020; ANTUNES *et al.*, 2020a; MARTINS VAZ *et al.*, 2021b). De acordo com a NBR 16.416 (ABNT, 2015), o pavimento permeável pode ser definido como:

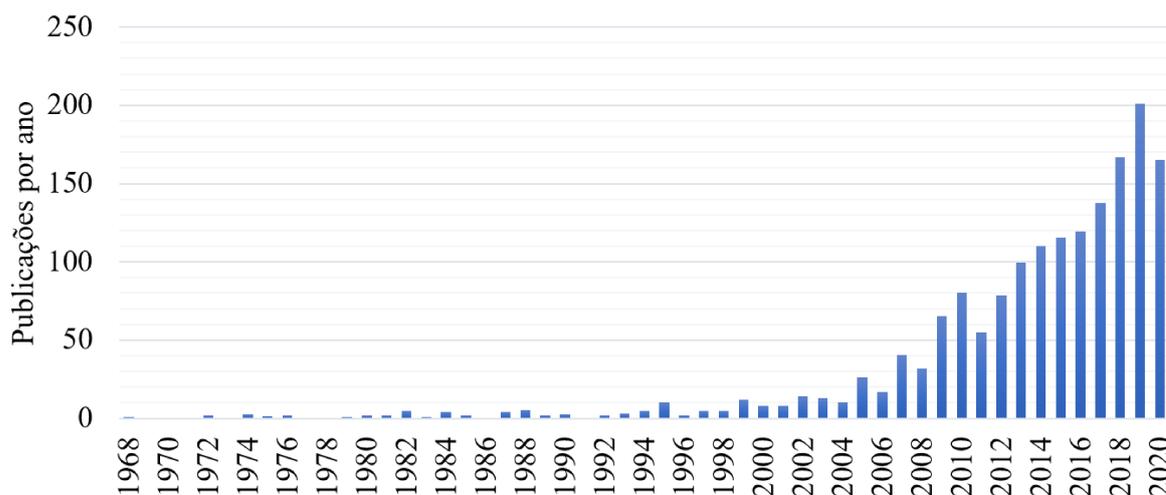
"Tipo de pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura."(ABNT, 2015, p. 2).

Ou seja, a concepção do pavimento permeável condiz com a mudança de filosofia de projeto da drenagem urbana. A mudança ocorre através da transição do modelo higienista, com captação em tubulações e transposição da água pluvial e seus poluentes à jusante, para o modelo de controle local, conforme apresentado nas seções anteriores. Para correto dimensionamento e efetividade, uma série de parâmetros devem ser testados, bem como a manutenção e controle da eficiência do sistema. O estado da arte atual condiz com a evolução da tecnologia, com estudos que contemplem as lacunas de conhecimento acerca da efetividade da técnica, bem como medidas de disseminação e popularização.

Para demonstrar a variação temporal dos estudos sobre pavimento permeável fez-se uma busca nos repositórios Scopus (ELSEVIER, 2020) e Web of Science (THOMSON REUTERS, 2016). A sequência de palavras utilizada para pesquisa foi: "Pavimento* permeável*" OR "Pavimento* drenante*" OR "Pavimento* poroso*" OR

"Pavimentos permeables" OR "Pavimentos drenantes" OR "Pavimentos porosos" OR "Pisos permeables" OR "Pisos drenantes" OR "Pisos porosos" OR "Pervious pavement*" OR "Permeable pavement*" OR "Draining pavement*" OR "porous pavement*". Os termos utilizados têm como base as principais nomenclaturas utilizadas para referência aos pavimentos permeáveis em artigos internacionais. Os termos foram avaliados em conjunto com o serviço de auxílio à bibliografia da Universidade Federal de Santa Catarina (BU-UFSC), de modo a evitar viés do autor. A Figura 9 mostra a evolução temporal do número de artigos em ambas as bases de dados Scopus e WOS. Foram encontrados 1568 publicações na base dados da Scopus e 1140 na base WOS, com publicações entre 1968 e 2022. O conjunto de artigos únicos de cada base somados aos similares em ambas as bases resultou em 1794 publicações únicas. Optou-se por escolher somente anos completos de publicação e foram agrupados os artigos similares encontrados em ambas as bases de dados.

Figura 9 – Evolução das publicações sobre pavimentos permeáveis mundialmente.



Fonte: Autor com base em Scopus e WOS

Dentro dos artigos da Scopus também foi realizada uma avaliação dos principais termos utilizados como palavras-chave. A Figura 10 mostra a nuvem de palavras que foi obtida por meio da avaliação das palavras-chave do autor nas publicações. A Figura 11 mostra a nuvem de palavras obtida das palavras-chave indexadas. O tamanho das palavras nas Figuras 10 e 11 corresponde ao número de aparências.

Percebe-se que os dois principais termos referentes aos revestimentos permeáveis são concreto e asfáltico, condizentes com estudos recentes como o de Guan *et al.* (2021). Outros termos de relevância nos estudos são relacionados à gestão, manutenção, dimensionamento e projeto de pavimentos permeáveis em relação à eficiência do sistema.

Figura 10 – Nuvem de palavras gerada com as palavras-chave indicadas pelos autores.

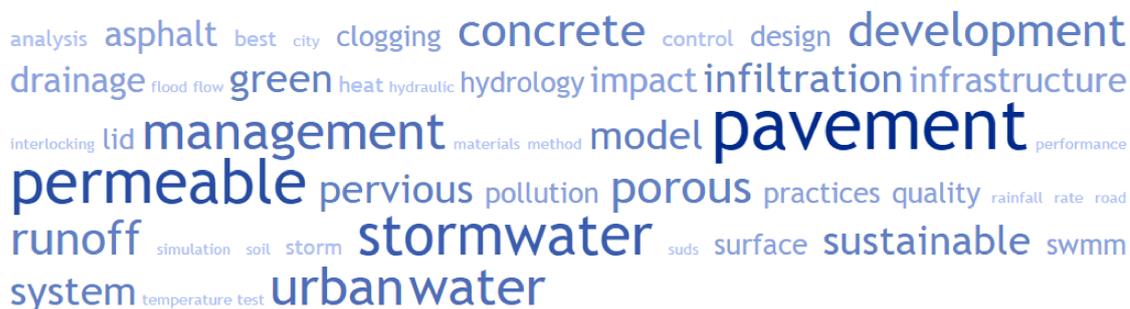


Figura 11 – Nuvem de palavras gerada com as palavras-chave indexadas nos artigos.

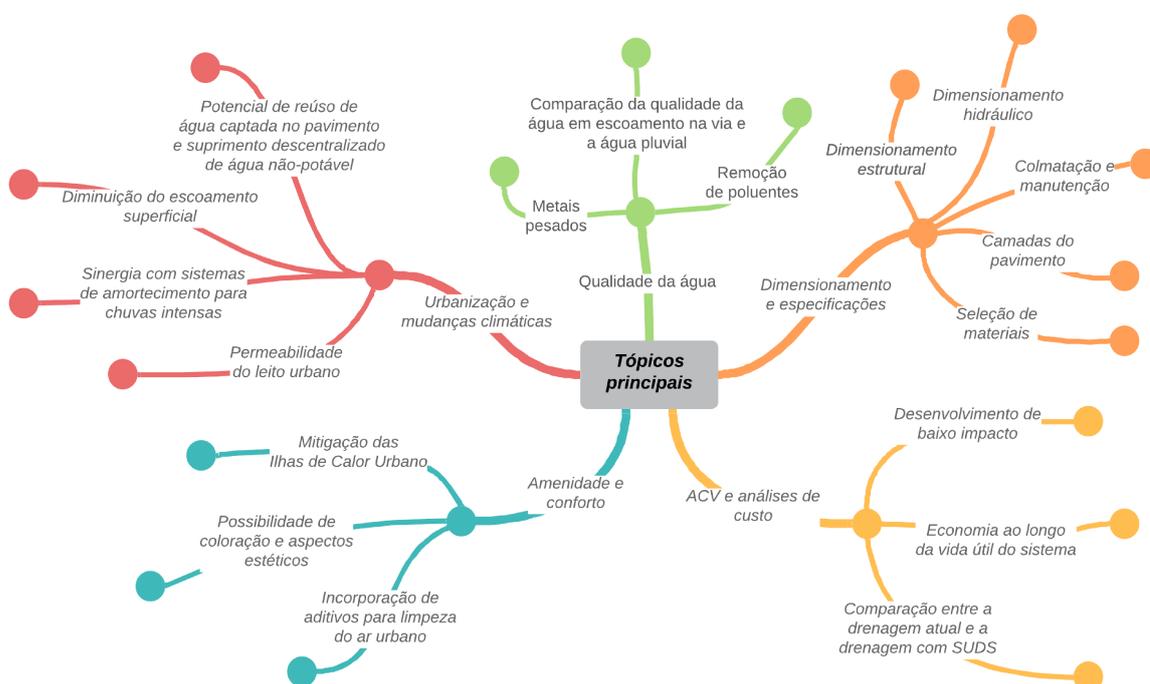


Alguns estudos contemplam mais de um dos temas, tentando abordar holisticamente a análise de pavimentos permeáveis como medida sustentável de drenagem e pavimentação. Antunes *et al.* (2020a), por exemplo, realizaram a análise de ciclo de vida de um sistema de captação de água pluvial por meio de pavimentos permeáveis. Outros autores, como Liu *et al.* (2020), realizaram a ACV de pavimentos permeáveis com a análise de impactos da mitigação de ilhas de calor urbano, desvio de rota, melhoria da qualidade, entre outros efeitos na fase de uso do sistema. Percebe-se que a avaliação individual dos temas é interessante de modo a obter maior eficiência e amadurecimento dos conhecimentos. Porém, torna-se importante também a realização de estudos com a avaliação ambiental e os diversos efeitos, benefícios e características dos pavimentos permeáveis, de modo a comprovar a sustentabilidade e resiliência da técnica.

Martins Vaz *et al.* (2021a), por exemplo, realizaram uma revisão de literatura sobre dez artigos publicados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) envolvendo pavimentos permeáveis. Os autores agruparam os temas dos artigos em sete principais categorias, envolvendo: potencial de economia de água potável, colmatção, quantidade de água infiltrada, qualidade da água infiltrada, ACV e suas variantes, dimensionamento hidráulico e dimensionamento estrutural. Dentre as conclusões,

corroborar-se para a análise que avaliações holísticas são necessárias para comprovar a sustentabilidade envolvendo pavimentos permeáveis. Também concordam sobre o potencial da técnica de captar água pluvial e disponibilizar descentralizadamente água para usos não-potáveis. De modo geral, similarmente a Martins Vaz *et al.* (2021a), pode-se agrupar os principais temas encontrados durante a bibliometria do tema, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Principais temas encontrados durante a revisão de bibliografia sobre pavimentos permeáveis.



Fonte: Autor (2021)

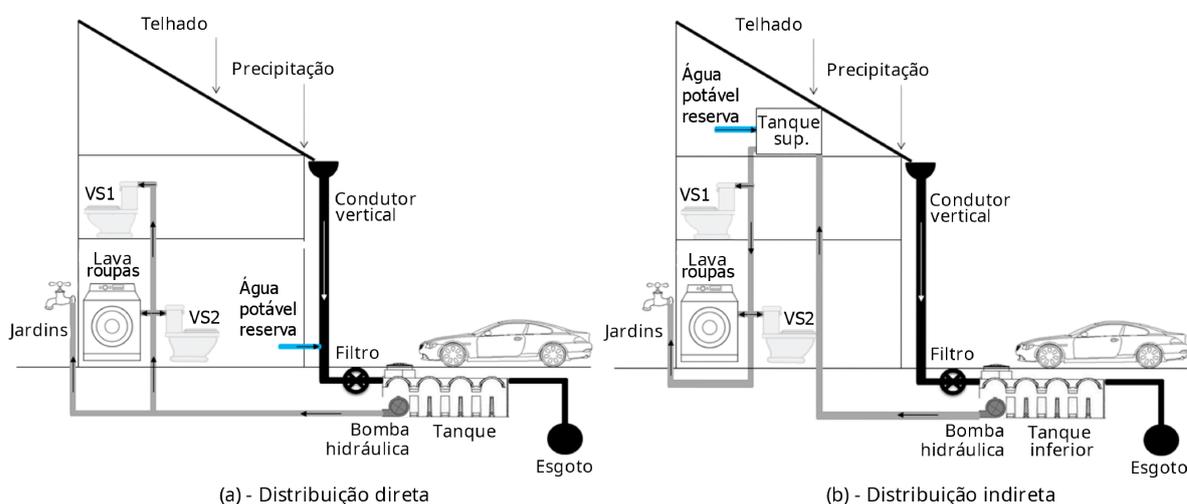
2.2.6 Captação de água pluvial descentralizada

A captação de água pluvial é um método milenar de disponibilizar água às civilizações. De modo generalizado, nomeia-se água pluvial como a água precipitada sobre uma superfície e o termo captação de água pluvial refere-se ao armazenamento logo após a incidência da precipitação e consequente direcionamento ao uso (CAMPISANO *et al.*, 2017). Desse modo, pode-se utilizar a água pluvial para os mais diversos fins, usualmente não-potáveis, diminuindo parcialmente as demandas hídricas requisitadas das concessionárias de água e obtendo economia de água potável (GHISI *et al.*, 2006; FREITAS; GHISI, 2020; TESTON *et al.*, 2018; CAMPISANO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2015; JING *et al.*, 2017) e também de energia (CUREAU; GHISI, 2020; MARTINS VAZ *et al.*, 2020).

Durante grande parte da história mundial a gestão centralizada de água fez-se presente nos centros urbanos, de modo a atender os padrões higienistas e garantir a segurança hídrica das cidades. Porém, com o avanço das mudanças climáticas e a necessidade de economizar água e garantir a resiliência hídrica, tem-se o retorno da captação de água pluvial como medida de auxílio no fornecimento. Outras características da captação de água pluvial que interessam os projetistas e gestores urbanos constam da possibilidade de sinergia com os sistemas de drenagem e o tratamento local da poluição.

No Brasil tem-se a captação de água pluvial regida por meio da NBR 15.527 (ABNT, 2019a). A norma traz os parâmetros necessários para dimensionamento e eficiência do sistema, bem como definições de manutenção e responsabilidades. Critérios qualitativos também são abordados, como condições de tratamento e de uso para a água captada, com diferentes tipos de uso permitidos. Neste contexto, outra norma de interesse é a NBR 16.783 (ABNT, 2019b) que trata de uso de fontes alternativas de água não-potável em edificações. A norma aborda outros parâmetros não contemplados pela NBR 15.527, contemplando usos mais brandos e fontes diferenciadas. A Figura 13 mostra um modelo típico de captação de água pluvial.

Figura 13 – Modelo de captação direta e indireta de água pluvial por telhados.



Fonte: Adaptado de Melville-Shreeve *et al.* (2016)

Mundialmente vê-se diversas cidades com avanços em direção à disseminação de técnicas de captação de água pluvial. Campisano *et al.* (2017) realizaram uma revisão de literatura acerca de sistemas de captação de água pluvial de modo a compreender as tendências de pesquisa e as principais conclusões obtidas mundialmente. Os autores comentam sobre a possibilidade da classificação de sistemas de captação de água pluvial como LID e SUDS, por possuírem a capacidade de atenuar a vazão

de pico e retomar parcialmente a hidrologia pré-ocupação. Também comentam sobre a possibilidade de tratamento local da poluição e a possibilidade de infiltração da água pluvial no solo, recarregando o lençol freático e auxiliando o microclima com efeitos de mitigação às ICU.

Campisano *et al.* (2017) indicam que os métodos de avaliação da eficiência de sistemas de captação de água pluvial ainda estão em estágios iniciais. Desse modo, a revisão crítica de literatura realizada pelos autores objetivou esclarecer o sucesso de implementação e os tópicos chave para a eficiência de sistemas de captação de água pluvial. Em relação à América do Sul, os autores comentam as diferentes tentativas de popularizar o uso da técnica como medida de auxílio no fornecimento hídrico, com o exemplo no Brasil do programa "Um Milhão de Cisternas", o qual objetivou construir cisternas de água pluvial no nordeste brasileiro de modo a combater a escassez hídrica. Os autores também comentam sobre as diferenças regionais intranacionais em relação ao incentivo, com algumas cidades obrigando por meio do código de obras a utilização de sistema de captação de água pluvial.

Teston *et al.* (2018) realizaram uma revisão de literatura sobre o uso de captação de água pluvial no Brasil. Por meio de uma base de dados com 48 dissertações de mestrado e onze teses de doutorado, os autores conseguiram separar nove principais temas encontrados, os quais contemplam linhas de pesquisa sobre captação de água pluvial. Os temas encontrados pelos autores são:

- Qualidade da água pluvial e possíveis riscos à saúde;
- Aceitação social do uso de água pluvial;
- Variáveis de projeto e de dimensionamento;
- Potencial de economia de água potável;
- Viabilidade econômica dos sistemas;
- **Impacto ambiental;**
- Impacto nos sistemas de drenagem;
- **Diferentes tipologias de área de captação;**
- Revisões de literatura.

Os autores comentam também sobre as tendências na pesquisa de uso de água pluvial, com constante publicação no Brasil. A possibilidade de melhorar o dimensionamento dos sistemas de captação, em específico o volume do reservatório, por meio de simulações é importante para garantir a viabilidade econômica, a confiabilidade e a eficiência do sistema. Outro ponto comentado remete ao estudo dos usos-finais, uma

vez que o parâmetro influencia no potencial de economia de água potável gerado pelo sistema. Dentre os trabalhos avaliados, Teston *et al.* (2018) obtiveram que as tipologias com maior percentual de usos não potáveis são edifícios públicos, com média de 77,0%, e edifícios de escritórios, com média de 69,6%.

Como conclusão, Teston *et al.* (2018) comentam sobre a inexistência de trabalhos brasileiros, até o momento da publicação, com avaliação de pluviometrias futuras para a simulação do potencial de economia de água potável. Desse modo, encontra-se a necessidade de incorporar a mudança climática no âmbito de pesquisas de captação de água pluvial, de modo a compreender os impactos futuros na eficiência e confiabilidade dos sistemas. Outras conclusões obtidas pelos autores abordam a viabilidade econômica, que foi atingida em maior número de casos na tipologia comercial, e as políticas públicas, com a obrigação legal de captação de água pluvial em algumas cidades brasileiras. Também citam a baixa existência de abordagens inovadoras ou processos experimentais relacionados aos sistemas de captação. Por fim, comentam sobre a possibilidade de utilizar edificações públicas como modelo de sucesso, atingindo desse modo o estado de referência e disseminando a técnica para demais tipologias. Alinha-se a essa conclusão o fato que edificações públicas apresentaram, em geral, maiores potenciais de economia de água potável e viabilidade econômica com *paybacks* mais curtos.

Istchuk (2021) avaliou a sensibilidade das variáveis de projeto de sistemas de captação de água pluvial em edificações residenciais para diferentes localidades brasileiras. O objetivo do autor foi de avaliar a influência de parâmetros de projetos e do regime pluviométrico no desempenho de sistemas de captação de água pluvial. Como resultado o autor obteve que o índice de sazonalidade, parâmetro que avalia a variação mensal da precipitação, foi o que obteve maior correlação com o potencial de economia de água potável, dentre os parâmetros pluviométricos. Em relação às variáveis de projeto, a demanda de água pluvial foi a de maior influência no potencial de economia de água potável, devendo-se atentar a exatidão da definição dos usos finais de projeto.

Sabe-se que o trabalho de Istchuk (2021) refere-se à tipologia residencial, podendo diferir de tipologias comerciais ou edifícios públicos. Desse modo, não se devem extrapolar os resultados obtidos pelo autor para as demais tipologias, por mais que sua metodologia possa ser replicada em estudos futuros. Outro ponto interessante obtido pelo autor foi o agrupamento de capitais brasileiras com padrões pluviométricos similares. O Quadro 2 mostra os seis grupos de agrupamento obtidos por Istchuk (2021) em relação aos padrões pluviométricos das capitais brasileiras. Martins Vaz *et al.* (2021b) escolheram em seu estudo de avaliação de captação de água pluvial por meio de pavimentos permeáveis oito cidades brasileiras com pluviometrias distintas. Desse modo, pode-se perceber que, dentre as oito cidades selecionadas, pelo menos

um exemplo de cada grupo mostrado no Quadro 2 foi obtido, o que também demonstra a diferenciação pluviométrica entre os grupos.

Quadro 2 – Agrupamento das capitais brasileiras em relação à pluviometria.

Grupo	Cidades
1	Belém, Manaus, Recife
2	João Pessoa, Macapá, Maceió, Natal, Rio Branco, Salvador
3	Curitiba, Florianópolis, Porto Alegre, Rio de Janeiro
4	Brasília, Goiânia, Palmas, São Luís
5	Aracaju, Boa Vista, Campo Grande, Cuiabá, Fortaleza, Porto Velho, São Paulo, Vitória
6	Belo Horizonte, Teresina

Fonte: (ISTCHUK, 2021)

2.2.7 Pavimentos permeáveis e captação de água pluvial

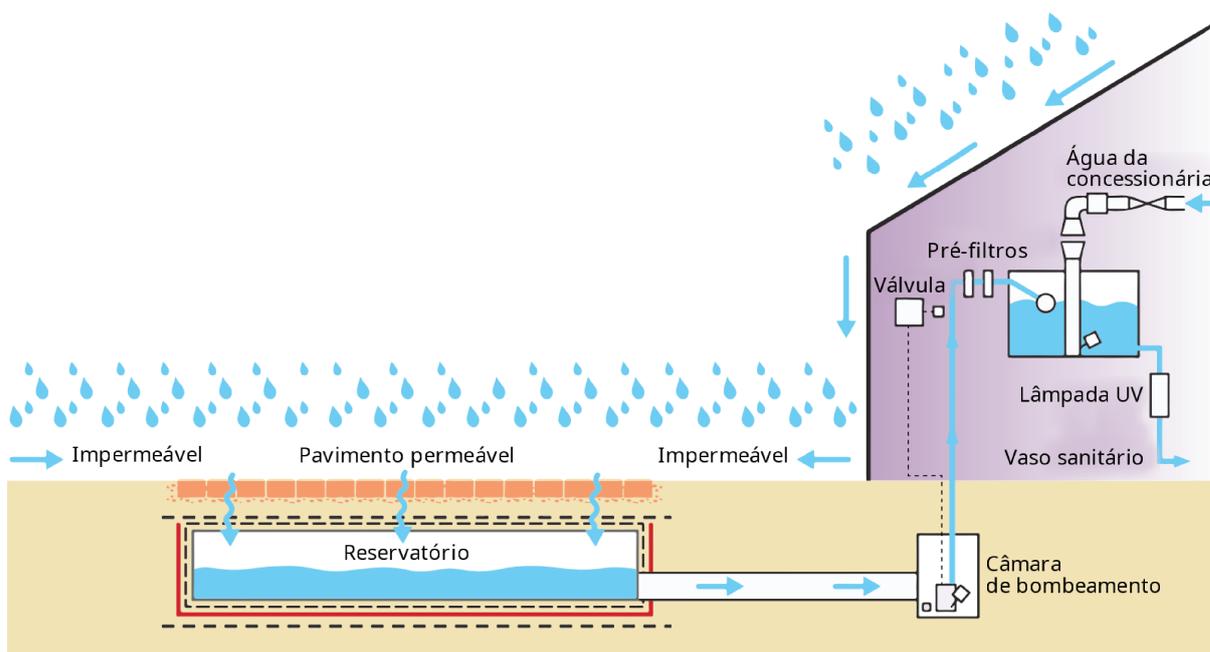
Com a evolução dos estudos sobre captação pluvial descentralizada e de pavimentos permeáveis, viu-se a possibilidade de incorporação de ambas as técnicas em um sistema conjunto que otimiza os benefícios de ambas as tecnologias. A possibilidade de integração da captação de água pluvial com SUDS e LID apresenta sinergias em termos do melhor manejo hídrico e direcionamento em relação a criação de cidades sensíveis à água (CAMPISANO *et al.*, 2017). Desse modo, diminui-se o escoamento superficial e estresse dos dispositivos de drenagem enquanto pode-se fornecer água para usos não-potáveis das edificações. Demais benefícios como mitigação das ICU, filtração de poluentes e amenidade local também se incorporam ao sistema em conjunto.

Hammes *et al.* (2018) realizaram um estudo sobre o potencial de economia de água potável por meio da utilização de pavimentos permeáveis na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os autores avaliaram qualitativamente e quantitativamente a água infiltrada, bem como simularam o potencial de economia para uma das edificações da UFSC por meio do programa computacional Netuno, versão 4 (GHISI; CORDOVA, 2014). O objetivo foi de complementar os conhecimentos acerca de pavimentos permeáveis e seu potencial de uso como área de captação de água pluvial para reúso em edificações públicas.

O trabalho realizado por Hammes *et al.* (2018) seguiu sequência à pesquisa de Antunes *et al.* (2016), o qual avaliou diferentes placas de concreto asfáltico drenante e a quantidade e qualidade da água infiltrada. Ambos os trabalhos utilizaram modelos de revestimento asfáltico drenante, com a incorporação de modificadores para melhoria da resistência do ligante asfáltico. Hammes *et al.* (2018) utilizaram do modificante

Tyreflex AB8, enquanto Antunes *et al.* (2016) utilizaram dois modelos com o polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) e dois modelos com borracha residual de pneus. Ressalta-se que os modelos de revestimento de Hammes *et al.* (2018) são oriundos dos estudos de Garcia *et al.* (2020) sobre a permeabilidade para diferentes placas de concreto asfáltico drenante. A Figura 14 mostra o modelo de captação de água de escoamento por meio de pavimentos permeáveis (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011).

Figura 14 – Modelo de captação de água pluvial por pavimentos permeáveis.



Fonte: Adaptado de Macintosh-watson *et al.* (2018)

Em contrapartida, ambos os trabalhos avaliaram o mesmo tipo de revestimento permeável, concreto asfáltico drenante. Desse modo, Ghisi *et al.* (2020) realizaram um estudo com a utilização de revestimento em blocos de concreto permeável. Os autores avaliaram qualitativamente e quantitativamente a água infiltrada com metodologia similar ao trabalho de Hammes *et al.* (2018) e compararam os resultados obtidos com ambos os tipos de revestimento. Como conclusões os autores obtiveram que o pavimento permeável com uso de blocos de concreto permeável obteve maiores taxas de infiltração em comparação ao revestimento asfáltico. Qualitativamente os resultados de Hammes *et al.* (2018) e Ghisi *et al.* (2020) apresentaram atendimento parcial da norma NBR 16783 (ABNT, 2019b), requisitando desse modo tratamento adicional para usos não-potáveis em edificações.

A sequência de trabalhos oriundos da UFSC sobre a junção de pavimentos permeáveis e captação de água pluvial tem constantes publicações desde 2016, com o objetivo de suprir as lacunas de conhecimento e difundir na academia a possibilidade

de captação de água de escoamento. Soma-se ao objetivo o intuito de avaliar SUDS e a possibilidade de atenuar futuras condições climáticas adversas, assunto do qual a pesquisa contribui continuamente. Desse modo, dentre os dez trabalhos agrupados por Martins Vaz *et al.* (2021a), seis utilizaram pavimentos permeáveis e avaliaram o potencial de economia de água potável por meio da captação de água pluvial. Os autores concluíram que as simulações realizadas nos trabalhos avaliados geraram potenciais entre 18,4 e 84,8%, a depender da tipologia, usos finais, área de captação e outros parâmetros. A Tabela 1 mostra o resumo do potencial de economia de água potável dos sete artigos citados por Martins Vaz *et al.* (2021a).

Tabela 1 – Resumo dos artigos de captação de água pluvial e pavimentos permeáveis oriundos da UFSC.

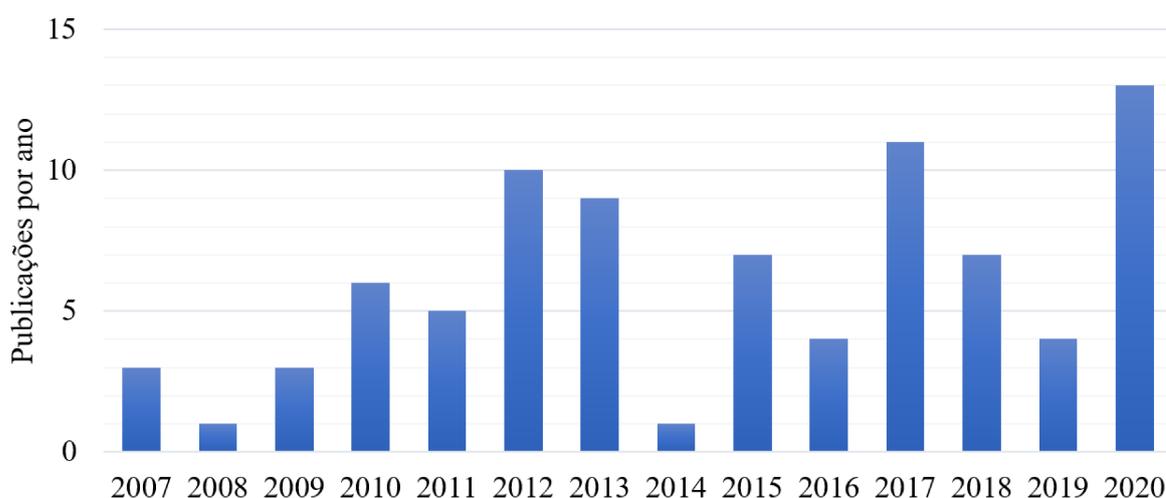
Artigo	Cidade	Modelo de pavimento	Tipologia	Área avaliada (m ²)	Usos finais não-potáveis (%)	Potencial de economia de água potável (%)
Antunes <i>et al.</i> (2016)	Florianópolis, BR	Placas de concreto asfáltico drenante	Residencial	11.044	19,4	19,4
			Pública		76,0	75,7
			Comercial		70,0	70,0
Antunes <i>et al.</i> (2020a)	Florianópolis, BR	Modelo B de Hammes <i>et al.</i> (2018)	Pública	5800	82,0	69,6
Antunes <i>et al.</i> (2020b)	Glasgow, IR	Modelo B de Hammes <i>et al.</i> (2018)	Residencial	28.505	37,0	34,5
Hammes <i>et al.</i> (2018)	Florianópolis, BR	Modelo A - Com camada filtrante	Universidade	5500	69,0	53,0
		Modelo B - Sem camada filtrante				54,0
Martins Vaz <i>et al.</i> (2020)	Florianópolis, BR	Modelo B de Hammes <i>et al.</i> (2018)	Universidade	1700	69,0	42,1
		Modelo de Acioli (2005)				43,6
		Modelo de Pinto (2011)				42,9
Martins Vaz <i>et al.</i> (2021b)	Oito cidades, BR	Modelo B de Enedir Ghisi <i>et al.</i> (2020)	Universidade	Variável em seis edificações	69, 77 e 85	18,4 a 84,8

Fonte: Adaptado de Martins Vaz *et al.* (2021a)

Uma segunda estratégia de busca foi realizada para compreender o estado da arte sobre a captação de água pluvial e pavimentos permeáveis. De forma similar à pesquisa realizada na subseção 2.2.5 foram elaboradas estratégias de buscas

aplicadas nas plataformas WOS e Scopus. A *string* utilizada para a pesquisa consta de: ("Captação de água pluvial" OR "Captação de água da chuva" OR "Captação de água" OR "Captación de agua pluvial" OR "Captación de agua de lluvia" OR "Captación de agua" OR "Water harvest*" OR "Stormwater harvest*" OR "Rainwater harvest*" OR "Water catch*" OR "Stormwater catch*" OR "Rainwater catch*") AND ("Pavimento* permeável*" OR "Pavimento* drenante*" OR "Pavimento* poroso*" OR "Pavimentos permeables" OR "Pavimentos drenantes" OR "Pavimentos porosos" OR "Pisos permeables" OR "Pisos drenantes" OR "Pisos porosos" OR "Pervious pavement*" OR "Permeable pavement*" OR "Draining pavement*" OR "porous pavement*"). Objetivou-se limitar os artigos àqueles que buscam utilizar a água captada diretamente no local. Foram obtidos 84 artigos pela plataforma Scopus e 59 pela WOS, dos quais a interseção dos dois bancos de dados culminou em 91 publicações. A Figura 15 mostra a evolução temporal dos artigos encontrados pela estratégia de busca.

Figura 15 – Evolução temporal da produção científica com termos sobre sobre captação de água pluvial e pavimentos permeáveis mundialmente.



Fonte: Autor (2021)

Dos 91 artigos obtidos, somente 69 foram encontrados em texto completo, dos quais foram quantificados o número de artigos por tema, utilizando a classificação de Martins Vaz *et al.* (2021a). Percebe-se que muitos dos artigos selecionados tratam separadamente de pavimentos permeáveis e de captação de água pluvial, como medidas complementares para a evolução das cidades em direção às cidades sensíveis à água. Dos 69 artigos com texto completo, somente dezenove tratam especificamente da captação de água diretamente no corpo do pavimento permeável e reúso local, seja para agricultura, edificações, ou ornamentos. Desse modo, classificou-se o seguinte número de aparições dos temas de Martins Vaz *et al.* (2021a) para os dezenove artigos finais, obtendo a seguinte sequência:

- Potencial de economia de água potável: nove artigos;
- Quantidade de água infiltrada: quatorze artigos;
- Qualidade da água infiltrada: dezesseis artigos;
- Avaliação do ciclo de vida do sistema: três artigos;
- Características de dimensionamento: cinco artigos;
- Modelo físico do pavimento: treze artigos;
- Aplicação em escala real para edificações: zero artigos.

Percebe-se que existe uma gama diversa de estudos que incluem pavimentos permeáveis e captação de água pluvial, porém a grande maioria trata separadamente das duas técnicas como sinérgicas para a construção de cidades sensíveis à água. Estudos que avaliem o processo de captação de água pluvial por meio de pavimentos permeáveis e os potenciais benefícios da junção das técnicas são raros e bastante focados em avaliar a quantidade e qualidade da água captada. Desse modo, poucos artigos avaliam a sequência lógica de pesquisa do tema, com a incorporação da análise de ciclo de vida e aplicação em escala real de protótipos.

Li *et al.* (2018), por exemplo, realizaram um estudo para otimização de modelos de captação de água pluvial em diferentes tipos de dispositivos. Os autores avaliaram a captação por telhados verdes, pavimentos permeáveis e terrenos naturais com drenagem, de modo a compreender os impactos ambientais encontrados na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos sistemas. Desse modo, pode-se juntar quatro objetivos de otimização, os quais incluíram: volume de água pluvial captada, redução do impacto na drenagem urbana, custo do ciclo de vida do dispositivo e impacto ambiental. Ou seja, os autores objetivaram encontrar a relação entre as quatro variáveis de modo a obter os melhores resultados ambientais, econômicos e técnicos nos sistemas propostos.

Como resultados os autores obtiveram que o sistema ótimo seria capaz de atender 14,7% da demanda doméstica da cidade de Beijing, ao passo de controlar 78,5% do escoamento gerado durante eventos de precipitação extrema. O modelo final constitui-se de uma otimização de áreas e de impactos em conjunto das três técnicas avaliadas. Concluíram, desse modo, que o uso de terrenos naturais é capaz de oferecer baixo impacto ambiental ao passo de captar água pluvial, porém pavimentos permeáveis também tornam-se interessantes por poder ofertar grande alívio à drenagem urbana. Ou seja, a necessidade de avaliar localmente as escolhas de projeto e a implantação dos SUDS é fundamental para a eficiência e sucesso da aplicação da técnicas. O uso da ACV tem sido crescente na literatura mundial e a aplicação para SUDS é fundamental para a junção da esfera ambiental no sucesso da prática.

Demais artigos avaliaram qualitativamente a água infiltrada para uso em irrigação (KAZEMI; HILL, 2015; NEWMAN *et al.*, 2015; NNADI *et al.*, 2015; MBANASO *et al.*, 2016), o potencial de economia de água potável em edificações públicas (HAMMES *et al.*, 2018; ANTUNES *et al.*, 2016, 2020a; MARTINS VAZ *et al.*, 2020, 2021b) ou residenciais (ANTUNES *et al.*, 2020b), entre demais usos e focos de pesquisa (WINSTON *et al.*, 2020a, 2020b; ZHANG *et al.*, 2017). Estudos com abordagens holísticas e incorporação de diferentes temas na otimização e projeto de pavimentos permeáveis para captação de água pluvial são fundamentais para a evolução da pesquisa e auxílio à incorporação de diferentes técnicas LID e SUDS para aumento dos benefícios urbanos.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta, ou metodologia, amplamente utilizada para avaliação ambiental de sistemas e produtos com o intuito de comparação e melhoria. No Brasil, tem-se como principal normativa para padronização e caracterização da técnica a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a). De acordo com a norma, pode-se definir a ACV como "compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida" (ABNT, 2009a).

Ou seja, objetiva-se por meio da técnica compreender os potenciais impactos ambientais de um sistema, ou produto, durante o ciclo de vida. Desse modo, pode-se identificar as potenciais melhorias para o produto, quais os principais indicadores de desempenho ambiental, métodos de disseminar melhor a informação e auxiliar os tomadores de decisão e também ao marketing. Para o marketing e para a gestão, interessa-se também garantir um sistema de governança ambiental, social e corporativa, de modo a demonstrar a sustentabilidade da gestão empresarial e ganhar confiança das partes interessadas. Pode-se, desse modo, demonstrar o interesse social e ambiental de uma empresa em garantir que seus valores e ações estejam coerentes com os de um mundo sustentável, crescentemente exigidos pela sociedade.

Nesse contexto, também interessa-se fugir de análises intuitivas de modo a evitar elementos de *greenwashing*. Netto *et al.* (2020) realizaram uma revisão sistemática com o termo *greenwashing*, de modo a compreender a definição do termo e as formas e características de realização de *greenwashing* no mercado. De modo geral não existe consenso na literatura sobre a definição exata de *greenwashing*, porém pode-se definir de modo amplo de acordo com as definições mais usuais de dicionários como: "ação corporativa deliberada com a presença de elementos para enganar as demais partes envolvidas". Ou seja, estudos, campanhas, ações que indiquem o bem-estar ambiental ao passo de ações que não corroboram com o fato. Para tal, a ACV torna-se uma ferramenta de transparência, de modo a poder servir como resposta às partes

envolvidas e evitar dúvidas quanto ao *greenwashing*.

Para garantir a transparência e a reprodutibilidade de estudos de ACV, faz-se necessário definir um processo de execução com princípios e considerações gerais, conforme é o objetivo da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a). Dentre os princípios da ACV tem-se: a perspectiva do ciclo de vida, com o objetivo de analisar toda a cadeia de elementos de um produto ou sistema; o foco ambiental, com a prioridade na caracterização dos impactos ambientais; a abordagem quanto à unidade funcional, de modo que a análise foque nos elementos referente a unidade funcional escolhida; iteratividade, de modo que as fases da ACV tenham interações entre si e garantam completeza e consistência; transparência, de modo a disponibilizar dados e produzir auditabilidade; completeza, almejando englobar todos os aspectos ambientais, sociais, de recursos e atributos envolvidos no processo; e por fim prioridade à abordagem científica, de modo a evitar análises tendenciosas ou juízo de valor (ABNT, 2009a).

A maturidade das pesquisas de ACV no contexto brasileiro também faz-se importante, de modo a compreender os objetivos e conclusões obtidas por meio da metodologia. Zanghelini *et al.* (2014) realizaram um estudo sobre a aplicação de ACV no Brasil entre 2003 e 2013, de modo a compreender os principais sistemas avaliados e principais autores. Dos 51 artigos encontrados, os autores obtiveram que 35% focaram em biocombustíveis, 30% em sistemas agropecuários e 15% em produção energética, com os demais em diferentes focos. Dentre as instituições de ensino com maior número de pesquisas em ACV tem-se como um dos destaques a UFSC. Demais conclusões corroboram com a dificuldade de avaliar a fase de pós-uso dos sistemas, como reciclagem ou descarte final, e com o crescimento da pesquisa de ACV no Brasil (ZANGHELINI *et al.*, 2014).

Guinée *et al.* (2011), por exemplo, realizaram uma pesquisa sobre o passado, presente e futuro da ACV no mundo, e diferentes abordagens que os autores acreditavam ser importantes para a avaliação holística no século XXI. Como evolução da análise sustentável, os autores citam que a Avaliação do Ciclo de Vida Sustentável (ACVS) é a avaliação mais ampla a ser realizada, com a incorporação de diversos modelos nas três esferas da sustentabilidade, contemplando entre os modelos a ACV. O objetivo de incorporar a tríade da sustentabilidade é averiguar os diversos efeitos diretos e indiretos, bem como todos os entes envolvidos na análise, abordando desde sistemas específicos até avaliações mais amplas. Ou seja, percebe-se que uma das dificuldades da ACV é focar majoritariamente no termo ambiental, e essa é uma evolução constante na pesquisa, objetivando incorporar as esferas social e econômica nas análises. Como demais conclusões os autores citam também a necessidade de desenvolver bancos de dados regionalizados para facilitar a execução de ACVs, o desenvolvimento de novas metodologias de impacto ambiental e métodos de incorporar incertezas nas análises realizadas.

Almeida *et al.* (2019) aplicaram um questionário em empresas brasileiras para compreender as dificuldades e vontades na aplicação de ACV para produtos. Como principais resultados os autores obtiveram que somente 20,5% das empresas utilizam ACV, 38,4% usam algum tipo de abordagem para o ciclo de vida (*life cycle thinking* - LCT) e 41,1% não usam nenhum tipo de ação. Dentre as empresas que usam LCT, as principais barreiras para o uso da ACV são a falta de dados completos e de dados em todas as etapas do ciclo de vida, as dificuldades de implantação de ferramentas para ACV em nível empresarial e de aplicação dos resultados para melhoria dos produtos. De modo geral, não foi observada demanda externa para uso da ACV, o que também comentam ser um obstáculo para o crescimento da ferramenta. Por fim, citam que o estudo é pioneiro, e que acreditam que falta incentivo governamental em relação à etiquetagem e cobrança ambiental e falta disseminação de informações sobre ACV, ambas ações que podem corroborar para o crescimento da técnica.

2.3.1 Etapas da avaliação do ciclo de vida

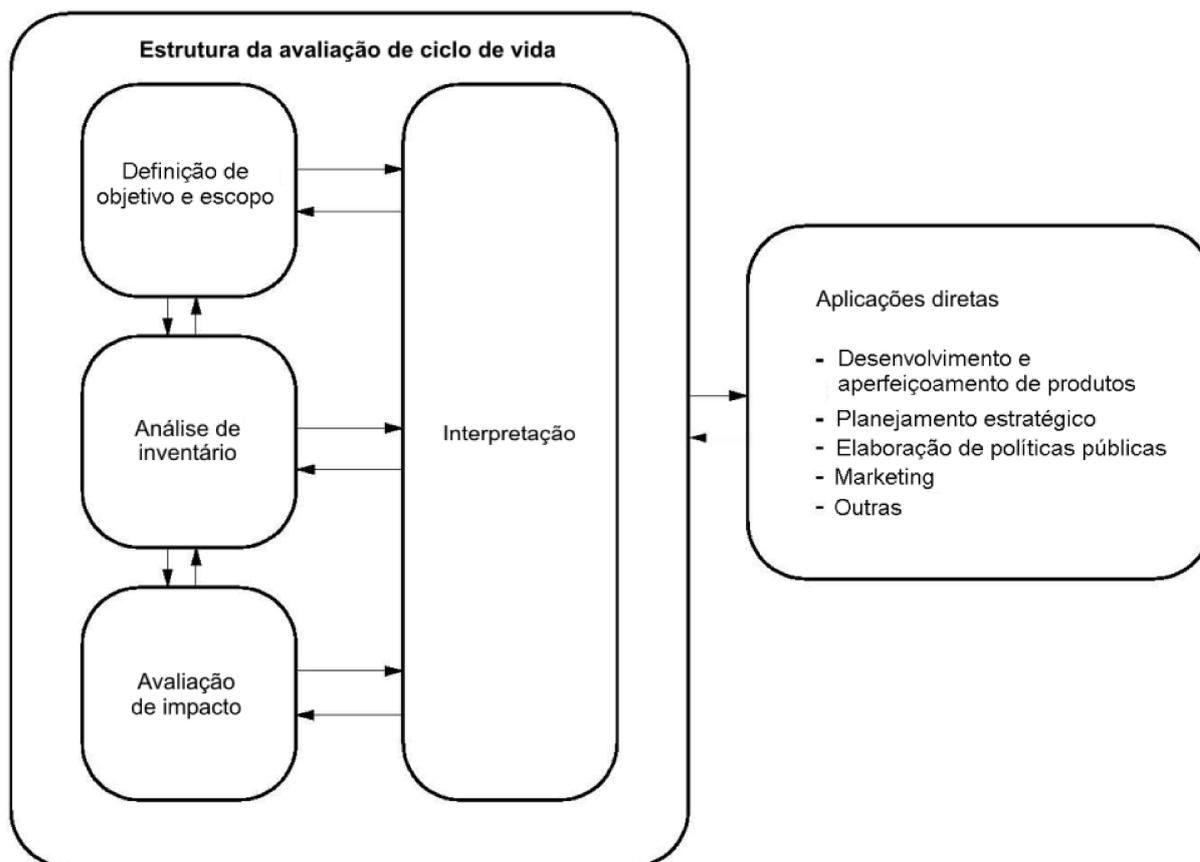
De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), quatro principais etapas são realizadas durante a ACV: definição de objetivo e escopo da pesquisa, análise do inventário, avaliação do impacto ambiental e interpretação dos resultados. A Figura 16 mostra a estrutura de fases de uma ACV (ABNT, 2009a). O objetivo de separar em etapas é facilitar a execução dos procedimentos e compreender a evolução do estudo, porém a iteratividade é fundamental na ACV, sendo necessário revisitar as etapas anteriores em cada avanço para confirmar os dados, as definições e o objetivo do projeto.

2.3.1.1 Objetivo e escopo

O objetivo e escopo de um trabalho de ACV servem para caracterizar as escolhas base da análise e limitar o estudo. De acordo com a NBR 14040 (ABNT, 2009a), o objetivo tem como respostas: a aplicação e uso do estudo, razões pelo qual está sendo realizado, público alvo a ser informado pelo estudo e se existe o interesse em comparar o modelo avaliado publicamente. Desse modo, o escopo deve estar compatível com o objetivo do estudo, contemplando: o sistema avaliado e as funções necessárias para avaliação, a unidade funcional e fronteira do estudo, procedimentos de alocação se necessários, categorias de impactos definidas, requisitos de dados, pressupostos, limitações e a forma de divulgação dos resultados. O escopo, desse modo, é uma receita inicial para justificativa e validação das definições de projeto, de modo que haja transparência quanto às escolhas que norteiam a avaliação e os resultados.

Dos termos acima, o principal e mais impactante para a comparabilidade dos resultados é a unidade funcional. A unidade funcional serve como referência de análise, sendo a função que serve como base de quantificação para as entradas e saídas

Figura 16 – Quatro etapas para a realização de uma ACV.



Fonte: ABNT (2009a)

avaliadas. A comparabilidade entre estudos se assegura por meio de uma unidade funcional comum, que garanta desempenho similar. A NBR 14040 (ABNT, 2009a) traz como exemplo o uso de toalha de papel e secador a ar, no qual uma unidade funcional comparativa válida seria o número idêntico de pares de mãos enxugadas por ambos os sistemas. Desse modo garante-se um desempenho similar e a comparabilidade.

Outro tópico importante é a definição da fronteira de análise. Faz-se necessário definir fronteiras bem estabelecidas uma vez que as limitações são base importante de um estudo de ACV. A inserção de todos os processos que influenciam, mesmo que marginalmente, no sistema avaliado faria com que a análise fosse muito complexa, demorada e com diversas incertezas. Desse modo, faz-se necessário simplificar e garantir a confiabilidade e comparabilidade, dadas as limitações da análise. Não deve-se dispor recursos em elementos que não alteram demasiadamente os resultados, devendo o pesquisador focar em garantir a confiabilidade dos principais processos.

Nesse contexto, surgem os termos: "berço", relacionado à fase de extração de materiais para fabricação do sistema; "túmulo" - disposição final dos resíduos gerados; e "portão", após a manufatura e pronto para ser transportado ao cliente (RIBEIRO, 2015). A definição da fronteira então pode contemplar do berço ao túmulo, com todas

as fases de um sistema, ou do berço ao portão, negligenciando a fase de uso e descarte, ou variações das mesmas dado o objetivo de análise. Porém, cita-se que é indicada na NBR 14040 (ABNT, 2009a) a necessidade de abordar processos de todas as fases do ciclo de vida do sistema ou produto, não devendo ser negligenciada a fase de uso ou de descarte, uma vez que podem gerar potenciais impactos ambientais relevantes. Demais características sobre corte e inclusão de processos, bem como de definição da unidade funcional e do escopo de análise podem ser obtidas na NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b).

2.3.1.2 Inventário

A etapa de inventário serve para quantificar os fluxos elementares e dados para as entradas e saídas relevantes ao estudo. Tem-se como partes importantes do inventário: a coleta de dados, de modo a obter os fluxos, entradas e saídas relevantes ao estudo; a validação dos dados, de modo a verificar possíveis incongruências e discrepâncias; e a alocação, com objetivo de ponderar os resultados para os fluxos, entradas e saídas de subsistemas que envolvam mais de um produto. Ressalta-se que o inventário e a obtenção de dados regionalizados são uma das grandes complexidades de uma ACV, com inclusão de incerteza e limitações (BJÖRKLUND, 2002). Cabe ao analista avaliar os bancos de dados e garantir que os dados utilizados estão de acordo com o objetivo e escopo da ACV, bem como documentar e apresentar transparência quanto às limitações.

A NBR 14044 (ABNT, 2009b) traz os requisitos de qualidade para dados de ACV, sendo: cobertura temporal, cobertura geográfica, cobertura tecnológica, precisão, completeza, representatividade, consistência, reprodutibilidade, fontes de dados e incerteza quanto à informação. Cada requisito possui definições específicas de modo a garantir que os dados utilizados condizam com o escopo de análise e demonstrem transparência e concordância com os objetivos da ACV. Ressalta-se também que a NBR 14044 (ABNT, 2009b) comenta sobre procedimentos para validação e alocação de processos com maior nível de detalhes em relação a NBR 14040 (ABNT, 2009a), caso o analista necessite realizar esses procedimentos.

2.3.1.3 Avaliação do impacto ambiental

Com o inventário dos fluxos, entradas e saídas, pode-se realizar a Avaliação dos Impactos ambientais do Ciclo de Vida do sistema ou produto (AICV). Ou seja, a partir do levantamento de fluxos de materiais, energias, resíduos, entre demais possibilidades, parte-se para a associação dos potenciais impactos. Para tal, pode-se dividir a fase de avaliação em sete processos, dos quais três são de caráter obrigatório e quatro de caráter opcional. O Quadro 3 mostra os processos obrigatórios e opcionais

para realização da AICV.

Quadro 3 – Processos obrigatórios e opcionais da AICV.

Processo	Caráter
Seleção da categoria de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização	Obrigatório
Correlação dos resultados da etapa de inventário com os respectivos impactos (classificação)	Obrigatório
Cálculo dos resultados dos indicadores de cada categoria (caracterização)	Obrigatório
Normalização da magnitude dos indicadores em relação à informações de referência	Opcional
Agregação e hierarquização das categorias de impacto	Opcional
Ponderação entre as diferentes categorias de impacto com base em fatores estabelecidos	Opcional
Análise da qualidade de dados para confiabilidade dos resultados dos indicadores	Opcional

Fonte: (ABNT, 2009b)

De acordo com Ribeiro (2015), os métodos de avaliação de impactos podem ser divididos em *midpoint* e em *endpoint*. As categorias de impacto *midpoint* têm como foco efeitos intermediários por meio de classificação em indicadores específicos, com o exemplo da categoria de impacto de acidificação dos solos. Os impactos em *endpoint* agrupam os impactos intermediários de *midpoint* em classificações mais subjetivas e direcionadas aos tomadores de decisão, com o exemplo da categoria de danos à saúde humana do método *ReCiPe 2016* utilizada por Antunes *et al.* (2020a).

Em relação aos possíveis métodos de AICV, podem-se citar os métodos *ReCiPe*, *IMPACT 2002+*, *CML 2001* e *Traci*. Bueno *et al.* (2016), por exemplo, avaliaram cinco métodos de AICV para um estudo de caso em diferentes tipos de parede de vedação externa para o contexto de construção civil brasileiro. Os cinco métodos avaliados pelos autores foram: *EDIP 97/2003* (*midpoint*), *CML 2001* (*midpoint*), *Impact 2002+* (*midpoint* e *endpoint*), *ReCiPe* (*midpoint* e *endpoint*) e o método *ILCD* (*midpoint*). Como conclusões gerais, os autores perceberam que as categorias similares em *midpoint* apresentaram valores bastante similares, salvo as categorias de depleção da camada de ozônio e oxidação fotoquímica que apresentaram divergências entre os métodos antigos e recentes. Em relação aos métodos de danos (*endpoints*), discrepâncias foram encontradas entre o *ReCiPe* e o *IMPACT 2002+*. Resultado esse também comprovado por Azevedo (2021), em seu estudo de caso sobre estratégias arquitetônicas para habitações de interesse social.

2.3.1.4 Interpretação dos resultados

A última etapa, denominada interpretação dos resultados, relaciona-se iterativamente com as três anteriores de modo a garantir a completeza dos resultados e o acordo entre o escopo definido e os resultados obtidos. Desse modo, as interpretações realizadas podem modificar as escolhas das etapas anteriores e levar a novos resultados, até que se atinja uma conclusão satisfatória e capaz de embasar a comparação ou tomada de decisão.

2.3.2 Estudos de ACV

A notoriedade da metodologia de ACV tem crescido amplamente no Brasil, com diversas pesquisas focadas em analisar ambientalmente sistemas de modo a diminuir o impacto ambiental humano. Tal foco é ainda mais enaltecido uma vez que mudanças climáticas são evidentes e os recentes relatórios do IPCC concordam com o fator antropogênico na mudança do clima. Desse modo, faz-se necessário estudar e avaliar sistemas dos mais diversos tipos, dos quais engloba-se a construção civil.

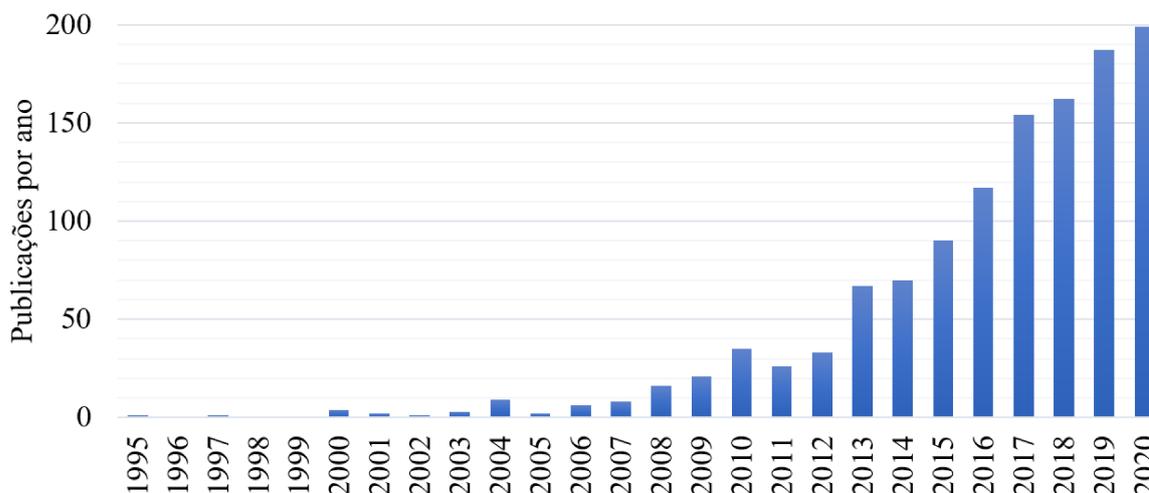
A Figura 17 mostra a evolução de artigos com os termos referentes à ACV produzidos no Brasil. Foram pesquisados nas plataformas da Scopus e WOS com a seguinte sequência de termos: ("Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Anal*" OR "Life-Cycle Assessment" OR "Life-Cycle Anal*" OR "Análise do Ciclo de Vida" OR "Avaliação do Ciclo de Vida"). Percebe-se que desde a concepção de sustentabilidade tem-se crescido continuamente o número de publicações produzidas no Brasil. Tal tendência é congruente com os estudos mundiais acerca da notoriedade do termo sustentabilidade, conforme, por exemplo, concluem Goni *et al.* (2015).

Mundialmente, entretanto, foram produzidas 37436 publicações com a sequência de termos sobre ACV, dos quais somente uma pequena parcela possui relação com pavimentos permeáveis, captação de água pluvial ou a junção de ambas as técnicas. A Tabela 2 mostra a relação entre as sequências de termos utilizadas e o número de publicações encontradas na plataforma Scopus. Para esta quantificação foram utilizados somente dados da Scopus, por abranger volume maior de publicações e simplificar o processo de separação.

Percebe-se que existe um vasto número de publicações sobre ACV, do qual o crescimento de publicações é nítido. Porém, somente uma pequena parcela das publicações dispõe foco sobre sistemas de captação de água pluvial, ou água em geral, e uma parcela menor dispões foco sobre pavimentos permeáveis. A junção de ambos os temas no protocolo de pesquisa gera somente seis resultados mundialmente, dos quais três estão no grupo de pesquisas citadas por Martins Vaz *et al.* (2021a). A Figura 18 mostra um diagrama de Venn com as interseções de pesquisa encontradas.

Também reitera-se que somente três dos seis resultados efetivamente avaliam

Figura 17 – Evolução do número de artigos de ACV no Brasil.



Fonte: Autor com base nas plataformas Scopus e WOS

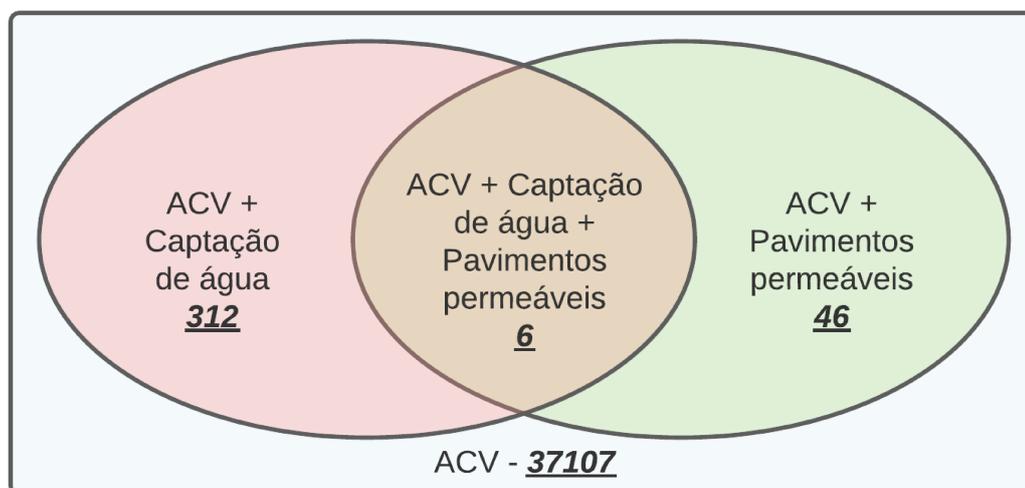
Tabela 2 – Resumo do número de artigos encontrado pelas estratégias de busca na Scopus mundialmente.

Termos utilizados para pesquisa	Publicações
("Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Anal*" OR "Life-Cycle Assessment" OR "Life-Cycle Anal*" OR "Análise do Ciclo de Vida" OR "Avaliação do Ciclo de Vida"))	37471
("Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Anal*" OR "Life-Cycle Assessment" OR "Life-Cycle Anal*" OR "Análise do Ciclo de Vida" OR "Avaliação do Ciclo de Vida") AND (("Rainwater" OR "Stormwater" OR "Water" OR "água da chuva" OR "água pluvial" OR "água") AND ("Harvest*" OR "Catch" OR "Captação"))	318
("Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Anal*" OR "Life-Cycle Assessment" OR "Life-Cycle Anal*" OR "Análise do Ciclo de Vida" OR "Avaliação do Ciclo de Vida") AND (("Permeable" OR "Porous" OR "Pervious" OR "Permeável" OR "Poroso") AND ("Pavement*" OR "Pavimento*" OR "Concrete" OR "Asphalt" OR "Concreto" OR "Asfalto"))	52
("Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Anal*" OR "Life-Cycle Assessment" OR "Life-Cycle Anal*" OR "Análise do Ciclo de Vida" OR "Avaliação do Ciclo de Vida") AND (("Permeable" OR "Porous" OR "Pervious" OR "Permeável" OR "Poroso") AND ("Pavement*" OR "Pavimento*")) AND (("Rainwater" OR "Stormwater" OR "Water" OR "água da chuva" OR "água pluvial" OR "água") AND ("Harvest*" OR "Catch" OR "Captação"))	6

Fonte: Autor baseado em Scopus

e comentam diretamente a captação por pavimentos permeáveis, conforme mostrado na subseção 2.2.7. Ou seja, atualmente no panorama mundial, todas as publicações encontradas na Scopus e WOS sobre a junção de ACV, pavimentos permeáveis e captação de água pluvial em edificações foram realizadas na UFSC. As seguintes subseções focam na avaliação de alguns exemplos de publicações obtidas por meio do protocolo de pesquisa da Tabela 2.

Figura 18 – Diagrama de Venn com os números de publicações por tema relevante à pesquisa, mundialmente.



Fonte: Autor com base nas plataformas Scopus e WOS.

2.3.2.1 ACV de sistemas de captação de água pluvial

A realização de ACV em sistemas de captação de água pluvial é fundamental para a evolução da gestão hídrica nas cidades em prol da sustentabilidade. Nesse intuito, diversos pesquisadores têm avaliado o uso de métodos descentralizados de captação, bem como alternativas para a captação centralizada, de modo a diminuir o impacto ambiental das concessionárias de água. As alternativas não se resumem somente às estratégias envolvendo água, como podem ser aplicadas indiretamente na modernização das instalações, no uso de energia fotovoltaica em estações de tratamento e outras abordagens tecnológicas. Lam e Hoek (2020), por exemplo, avaliaram possíveis estratégias a serem utilizadas pela concessionária de água de Amsterdã, na Holanda, para o abatimento de emissão de gases de efeito estufa. Como principal conclusão, os autores comentam que diversas alternativas tornam-se interessantes economicamente para as concessionárias de água, sendo muitas delas oportunidades de estratégias amplas, que não envolvem diretamente as ações da concessionária. Desse modo, interessa-se, como sociedade, observar as possíveis sinergias e parcerias entre os diferentes setores da sociedade para valorizar e amplificar o uso de estratégias mais sustentáveis.

Em relação à captação de água pluvial e uso direto em edificações, inúmeros estudos presentes na literatura avaliaram a ACV dos sistemas. Trabalhos no tema começaram a ser explorados no início do século XXI, com Tarantini e Ferri (2003) como uma das primeiras publicações disponíveis. Os autores avaliaram um sistema inovador, à época, de captação de água pluvial, uso racional de água e reúso de água

cinza em apartamentos localizados na Itália. Os autores obtiveram que os custos de instalação da captação de água pluvial e reúso de água cinza não eram viáveis em termos de retorno financeiro na vida útil, porém a instalação do sistema seria capaz de diminuir os impactos ambientais do uso de água dos apartamentos. Tarantini e Ferri (2003) também obtiveram que a energia gasta na fase de uso para bombeamento hídrico foi o maior impacto ambiental avaliado tanto para o sistema inovador, com água pluvial e água cinza, como para o tradicional. Por fim, citam que somente com a adoção de aparelhos economizadores de água por 25% dos moradores da cidade geraria um milhão de metros cúbicos de água economizada por ano. Ou seja, deve-se atentar também as soluções mais baratas e de fácil implantação, que podem mais facilmente auxiliar na redução dos impactos e na redução da demanda hídrica.

Nazer *et al.* (2010) avaliaram os impactos ambientais, sociais e econômicos da adoção de diferentes tipos de estratégias para manejo hídrico em residências na Palestina. Os autores tinham como objetivo avaliar a aplicabilidade, bem como as variáveis econômicas e ambientais da instalação de diferentes tipos de tecnologias. Foram avaliados o uso de captação de água pluvial, aeradores em torneiras, chuveiros de baixa vazão, descargas de duplo acionamento, banheiros secos, ações para prevenção de vazamentos nas tubulações e reúso de água cinza. Citam que desse modo pode-se atingir mais facilmente o esquema de casa do futuro, com a abordagem de uso-tratamento-reúso localmente.

Como principais conclusões os autores obtiveram que a adoção dos diferentes métodos foi capaz de diminuir a demanda hídrica em até 50%. Em relação aos impactos ambientais, pode-se reduzir até 38% se considerados o uso de sistemas de captação de água pluvial. Demais alternativas também resultaram em redução de impactos ambientais, com a viabilidade econômica encontrada para o uso de aeradores de torneiras, chuveiros de baixa vazão e descargas de duplo acionamento. Ou seja, pode-se auxiliar na evolução para a casa do futuro por meio das tecnologias propostas, aumentando a independência hídrica e sanitária dos usuários. Os autores também concluíram que existe grande aceitação social e vontade dos moradores da região avaliada na Palestina para uso racional de água e conservação dos recursos hídricos. Citam que a educação sobre o tema é fundamental para o avanço da sustentabilidade hídrica na casa do futuro.

Angrill *et al.* (2012) realizaram a ACV de diferentes abordagens de planejamento urbano, difuso e compacto, para diferentes tipos de sistemas de captação de água pluvial. Os autores utilizaram como unidade funcional a entrega de 1 m³ de água pluvial por pessoa por ano e o método de avaliação do impacto *CML 2001*, bem como o programa computacional SimaPro 7.2.0 para execução da ACV e a base de dados Ecoinvent 2.0 para fluxos e infraestruturas dos sistemas. Todos os sistemas avaliados consideram a captação de água pluvial via telhados das edificações, diferindo o tipo e

a localização da cisterna para armazenamento. Em relação às fases do ciclo de vida analisadas, os autores consideraram as fases de materiais, transporte, construção, uso e desconstrução, sem a utilização da fase de descarte ou reciclagem dos materiais. O objetivo era avaliar se as diferentes localizações das cisternas e as diferentes abordagens de planejamento urbano influenciam no impacto ambiental dos sistemas de captação de água pluvial.

Uma análise adicional interessante feita por Angrill *et al.* (2012) é o requisito estrutural posto sobre a estrutura da edificação para cada tipo de localização da cisterna. O reforço estrutural foi adicionado ao inventário dos sistemas, de modo a compreender os impactos da localização. Os resultados obtidos pelos autores demonstram que a localização do tanque sobre o telhado da edificação foi a posição mais otimizada, com a consequente distribuição estrutural uniforme na edificação. Tal resultado foi independente do planejamento urbano concentrado ou difuso, porém com tendências diferentes para ambos os modelos. Para o planejamento compacto, observou-se menores impactos ambientais, de modo geral, com o sistema de distribuição hídrica sendo o principal contribuinte. Para o planejamento difuso, observou-se que os impactos relacionados à cisterna foram os principais contribuintes. Concluem, portanto, que o planejamento dos sistemas de captação de água pluvial deve ser incorporado desde a fase de planejamento urbano, de modo a otimizar os resultados e diminuir as emissões de gases de efeito estufa e demais impactos ambientais. A integração da variável ambiental na tomada de decisões é fundamental para a validação de sistemas com o intuito de garantir sustentabilidade.

Vialle *et al.* (2015) realizaram a ACV de um sistema de captação de água pluvial para residências na França. Os autores utilizaram o programa computacional SimaPro para execução da ACV e a base de dados Ecoinvent 3.1 para realização do inventário. Em relação ao método de avaliação dos impactos ambientais, os autores utilizaram o método Impact 2002+, e validaram os resultados com o método ReCiPe, de modo a confirmar os resultados obtidos. Como resultado principal, Vialle *et al.* (2015) obtiveram que o sistema suprido somente por água potável e o sistema suprido parcialmente por água pluvial geraram impactos ambientais similares quando consideradas todas as fases do ciclo de vida. Porém, citam que o sistema com captação de água pluvial pode ser capaz de diminuir o estresse hídrico dos mananciais, por exigir menos água captada, o que é interessante no contexto de escassez hídrica. Outro ponto interessante é a possibilidade de consideração do sistema de desinfecção da água pluvial, elemento abordado em um dos cenários analisados pelos autores. Todas as considerações são elencadas como local-dependente e tecnologia-dependente, o que faz com que também comentem a abordagem específica da ACV realizada, com diversas considerações específicas ao sistema analisado. Por fim, características de projeto podem ser otimizadas de modo a diminuir o impacto ambiental global e favorecer tecnologias

descentralizadas. Tem-se como exemplo a otimização do volume e localização das cisternas de água pluvial e o uso de água pluvial congruente com o planejamento urbano das cidades, conforme anteriormente citado por Angrill *et al.* (2012).

A Tabela 3 mostra um resumo dos artigos encontrados na literatura que realizaram a ACV/ACCV de sistemas de captação de água pluvial. Foi indicada a presença da análise de água cinza nos artigos uma vez que alguns dos trabalhos avaliam os sistemas em conjunto.

Leong *et al.* (2019) realizaram a ACV e Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) de diferentes tipos de abastecimento hídrico para uma edificação comercial e uma edificação residencial, na Malásia. A Figura 19 mostra um esquema detalhado das fases, fluxos e elementos considerados na ACV realizada pelos autores, bem como apresenta os diferentes cenários que envolvem o abastecimento convencional, o uso de captação de água pluvial, o reúso de água cinza e um sistema híbrido com água pluvial e água cinza. Outros trabalhos também avaliaram com maior foco a ACCV de sistemas de captação de água pluvial, de modo a entender a aplicabilidade do sistema. Também cita-se que muitos trabalhos avaliam ACV de sistemas de captação de água pluvial, cada um com diferentes localidades, características da envoltória de análise e métodos de avaliação dos impactos. Outro ponto importante de ressaltar é a presença de diferentes tipologias, com estudos que avaliam edificações comerciais, residenciais, universitárias, entre outros.

Cita-se que muitos dos trabalhos encontrados avaliam sistemas com foco em uso residencial, com mais da metade dos trabalhos presentes na Tabela 3 referentes à tipologia residencial. Das demais tipologias, percebe-se foco em estudos macroscópicos a nível municipal, com dois trabalhos específicos para universidades e três trabalhos específicos à tipologia comercial. Em relação à qualidade da água tratada, a majoritária parte dos trabalhos considerou usos não-potáveis com tratamentos simples para melhoria básica, com alguns poucos trabalhos realizando tratamentos terciários para obtenção de água potável. Também se cita que foram encontrados trabalhos com captação em vias (*stormwater*), dos quais há maior preocupação com a qualidade para os fins de potabilização (HOFMAN-CARIS *et al.*, 2019). Sobre as características da ACV, percebe-se não haver consenso quanto ao programa, método de avaliação dos impactos ou banco de dados, devendo ser avaliado pelo pesquisador qual melhor atende os objetivos do estudo. O programa mais utilizado foi o *Simapro*, com nove estudos, seguido do *Gabi*, com cinco estudos, e *OpenLCA*, com três estudos. Em relação ao banco de dados percebe-se grande utilização da base *Ecoinvent*. Por fim, o método mais utilizado foi o método *ReCiPe*, tanto nas versões 2008 como 2016, seguido de *CML2001*, *Traci 2.1* e *IMPACT 2002+*, respectivamente.

Tabela 3 – Resumo das características dos principais artigos encontrados na Scopus sobre ACV e captação de água pluvial e água cinza.

Artigo	ACV	ACCV *	V.E.	Método de AICV	Banco de dados ²	Programa	Tipologia
Tarantini e Ferri (2003) ¹	X	X	Não	CML 92 e IPCC 98	Team 3.0 database	Team	Residencial
Racoviceanu e Karney (2010)	X	-	-	Simplificado	Trabalhos anteriores	-	Residencial
Nazer <i>et al.</i> (2010) ¹	X	X	Não	Eco-indic. 99	Eco-indicator 99 database	-	Residencial
Anand e Apul (2011)	X	X	Sim	Simplificado	Dados próprios	-	Universitária
Marinoski e E. Ghisi (2011)	X	X	Sim	Simplificado	Trabalhos anteriores	-	Residencial
Angrill <i>et al.</i> (2012)	X	-	-	CML 2001	Ecoinvent 2.0	Simapro	Residencial
Rahman <i>et al.</i> (2012)	-	X	Sim	-	-	-	Residencial
Godskesen <i>et al.</i> (2013)	X	-	-	EDIP 1997	HOFOR e outros	Gabi	Escala municipal
Hajani e Rahman (2014)	-	X	Não	-	-	-	Residencial
Devkota <i>et al.</i> (2015)	X	X	Sim	Simplificado	Ecoinvent	Gabi	Universitária
Morales-Pinzón <i>et al.</i> (2015) ¹	X	X	Sim	CML 2001	Ecoinvent 2.2	Simapro	Residencial
Vialle <i>et al.</i> (2015)	X	-	-	IMPACT 2002+ e ReCiPe	Ecoinvent 3.1	Simapro	Residencial
García-Montoya <i>et al.</i> (2016) ¹	X	X	Sim	IMPACT 2002+	Trabalhos anteriores	-	Residencial
Valdez <i>et al.</i> (2016)	X	X	Sim	Simplificado	Ecoinvent 3 e outros 2	-	Escala municipal
Angrill <i>et al.</i> (2017)	X	-	-	CML 2001	Ecoinvent 2.2	Simapro	Residencial
Sweeney e Pate (2017)	-	X	Sim	-	-	-	Residencial
Ghimire <i>et al.</i> (2017)	X	-	-	Traci 2.1 / ReCiPe	Ecoinvent 2.2 e outros	OpenLCA	Comercial
Yan <i>et al.</i> (2018)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.0	Simapro	Escala municipal
Petit-Boix <i>et al.</i> (2018)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.0	Gabi	Escala municipal
Yi Li <i>et al.</i> (2018)	X	X	Não	CML 2001	Gabi database	Gabi	Escala municipal
Zanni <i>et al.</i> (2019) ¹	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 2.2	Simapro	Residencial
Faragò <i>et al.</i> (2019)	X	X	Sim	ILCD	Ecoinvent 3.3 / EASETECH	-	Residencial
Abas e Mahlia (2019)	-	X	Não	-	-	-	Residencial
Ghimire <i>et al.</i> (2019)	X	-	-	Traci 2.1	Ecoinvent 2.2 e outros	OpenLCA	Comercial
Hofman-Caris <i>et al.</i> (2019)	X	X	Não	ReCiPe	Ecoinvent 3.0	Simapro	Residencial e municipal
Leong <i>et al.</i> (2019) ¹	X	X	Sim	CML 2001 / Traci 2.1	Ecoinvent 3.3	Gabi	Comercial e residencial
Marinoski e E. Ghisi (2019) ¹	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 2.2	Simapro	Residencial
Vargas-Parra <i>et al.</i> (2019)	X	X	Sim	ReCiPe	Pluvisoft data e Ecoinvent 3	Não comenta	Residencial
Tarpani <i>et al.</i> (2021)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.5	OpenLCA	Várias
Thomassen <i>et al.</i> (2021)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.5	Simapro	Residencial

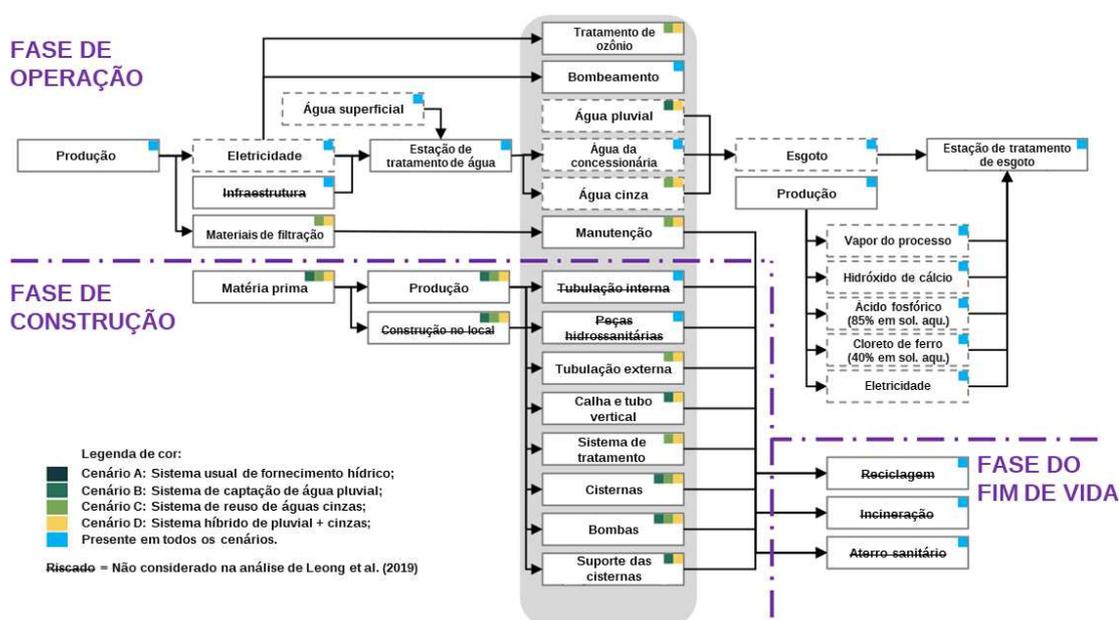
* Viabilidade econômica em algum dos cenários avaliados, pelo menos.

¹ Ocorre a análise em conjunto, ou separada, de água pluvial e reúso de água cinza.

² Outros documentos podem ter sido utilizados para suprir o inventário.

Fonte: Autor (2021)

Figura 19 – Exemplo feito por Leong *et al.* (2019) dos diferentes fluxos e processos que podem ser considerados em uma ACV de fornecimento hídrico.



Fonte: Traduzido de Leong *et al.* (2019).

2.3.2.2 ACV de pavimentos permeáveis

Foram obtidos 52 artigos por meio do protocolo de busca que contempla pavimentos permeáveis e ACV. Percebe-se que a produção científica sobre o assunto vem crescendo continuamente, com maior produção de artigos a partir do ano de 2018. Também cita-se que muitos artigos foram produzidos na China, com grande interesse pelo tema para a aplicação em cidades esponja, controle de enchentes e resiliência às mudanças climáticas futuras. Os dois artigos mais antigos que atendem ao protocolo de pesquisa são de 2013 (GLICK *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2013) e ambos tratam da ACV como ferramenta para poder avaliar os impactos ambientais da adoção de pavimentos permeáveis. Dos 52 artigos encontrados, 33 estão disponíveis em texto completo, dos quais pode-se separar metadados similares aos da Tabela 3. A Tabela 4 mostra as características dos estudos de ACV sobre pavimentos permeáveis. Optou-se por mostrar também o revestimento estudado, de modo a compreender a existência de estudos com diferentes revestimentos permeáveis.

Tabela 4 – Resumo das características dos principais artigos encontrados na Scopus sobre ACV e pavimentos permeáveis.

Artigo	ACV	ACCV	* V.E.	Método de AICV	Banco de dados ²	Programa	Revestimento
Ranran Wang <i>et al.</i> (2013)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 2.2	Simapro	CP
Glick <i>et al.</i> (2013)	X	X	Não	Simplificado	Literatura	-	AP
Hengen <i>et al.</i> (2016)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 2.1 e NREL	Simapro	AP
Zhan e Chui (2016)	X	X	Sim	Simplificado	Literatura	-	Não define
Maiolo <i>et al.</i> (2017)	X	-	-	IMPACT 2002+	Não diz	Simapro	CP
Antunes <i>et al.</i> (2018)	-	-	-	-	-	-	RL
Yu Wang <i>et al.</i> (2018)	X	-	-	Simplificado	Literatura	-	AP
Yuan <i>et al.</i> (2018)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.0 e Simapro db ³	Simapro	CP
Bhatt <i>et al.</i> (2019)	X	-	-	Traci 2.1	Ecoinvent 3.0	Simapro	CP
Guoyang Lu <i>et al.</i> (2019)	X	-	-	Simplificado	Literatura	-	AP e PU
Xu <i>et al.</i> (2019)	-	X	Sim	-	-	-	Não define
Yao <i>et al.</i> (2019)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.0	Simapro	CP
Jian Shuih Chen <i>et al.</i> (2019)	X	-	-	Simplificado	Literatura	-	CP
Ellingboe <i>et al.</i> (2019)	X	-	-	Simplificado	Athena db ³	Athena	CP
Antunes <i>et al.</i> (2020a)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.5	Simapro	AP
Antunes <i>et al.</i> (2020b)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.5	Simapro	AP
Rodríguez-Fernández <i>et al.</i> (2020)	X	X	Sim	Receipe	Gabi db ³	Não diz	AP
Landi <i>et al.</i> (2020)	X	-	-	ReCiPe	Gabi db ³	Gabi	AP
Yu Li <i>et al.</i> (2020)	-	X	Não	-	-	-	AP
Liu <i>et al.</i> (2020)	X	X	Sim	Traci 2.0	Gabi db ³	Não diz	AP
Martins Vaz <i>et al.</i> (2020)	X	X	Sim	ACVE sim- plificada	-	-	AP
Peceño <i>et al.</i> (2020)	X	-	-	CML-IA	Ecoinvent 3.1	Simapro	CP
Singh <i>et al.</i> (2020)	X	X	Sim	Simplificado	Indian const. db ³	-	CP
Turco <i>et al.</i> (2020)	X	-	-	IMPACT 2002+	Ecoinvent	Não diz	CP
Bizarro <i>et al.</i> (2021)	X	-	-	SBK Bepalings- methode	Ecoinvent 3.5 e NMD 3.1	Manual	AP
Fathollahi e Coupe (2021)	X	-	-	ReCiPe	Ecoinvent 3.5	Simapro	CP
Gupta <i>et al.</i> (2021)	X	-	-	CML 2001	Literatura	Não diz	AP
Hung <i>et al.</i> (2021)	X	X	Não	ReCiPe	Ecoinvent 3.0	Não diz	AP
Chenghao Wang <i>et al.</i> (2021)	-	-	-	-	-	-	RL
Paula Junior <i>et al.</i> (2021)	X	-	-	CML-IA	Ecoinvent 3.0	Simapro	CP
Weixia Wang e Chang (2021)	X	-	-	Pegada hídrica	CLCD db ³	Manual	CP
Peterson <i>et al.</i> (2021)	X	X	Sim	Traci 2.1	Gabi db ³	Gabi	AP
Xiaodan Chen e Hao Wang (2022)	X	-	-	ReCiPe e IPCC	Literatura trabalhos	Não diz	CP

* Leia-se apresentar um custo benefício melhor que uma das outras alternativas analisadas.

¹ Outros documentos podem ter sido utilizados para suprir o inventário.

² CP - Concreto Permeável / AP - Asfalto permeável / PU - Poliuretano / RL - Revisão de Literatura.

³ db - database.

Fonte: Autor (2021)

Os trabalhos selecionados também avaliam diferentes tópicos sobre ACV, dependendo dos objetivos de cada autor. Como exemplo, Glick *et al.* (2013) avaliaram os impactos da matéria prima, manufatura, uso, manutenção e fim de vida de um pavimento com o uso de asfalto permeável e um com asfalto convencional. Para o comparativo, os autores concluíram que o pavimento permeável era mais oneroso e mais impactante em termos de potencial de aquecimento global. Porém, citam como discussão final, que os impactos benéficos da melhoria qualitativa da água e recarga do lençol freático não foram considerados. Analogamente, ao analisar as demais ACVs encontradas, percebe-se que o estudo de Glick *et al.* (2013) também não considerou outros efeitos como a diminuição do escoamento superficial e a diminuição das ilhas de calor urbano.

Wang *et al.* (2018) estudaram os impactos ambientais de pavimentos permeáveis por meio de uma metodologia básica que incorpora os efeitos das inundações, da reciclagem da água e da purificação da água, baseados nos princípios da ACV. A purificação da água levou em consideração a concentração de chumbo, zinco, fósforo total e nitrogênio total, com a taxa de remoção dos parâmetros baseada em estudos da literatura. Como resultados, em um estudo de caso aplicado, os autores obtiveram a capacidade de remoção de uma tonelada de zinco e aproximadamente sete toneladas de fósforo total, além da remoção de chumbo e nitrogênio total durante a fase de uso. A influência da incorporação da qualidade da água na análise é de extremo valor, com aproximadamente 22% dos impactos obtidos em emissões de gases de efeito estufa e 25% do consumo de energia. Por fim, os autores concluem que os pavimentos permeáveis foram ambientalmente melhores em todos os aspectos avaliados e reforçam que se deve avaliar com atenção os impactos da fase de uso, pois são de extremo impacto ambiental durante a vida útil dos pavimentos.

Lu *et al.* (2019) compararam ambientalmente três tipos de revestimentos permeáveis por meio de uma ACV com escopo que possui sete etapas: extração de materiais, construção, uso, manutenção e reabilitação, congestionamento, transporte e fim de vida. Os pavimentos avaliados possuem revestimentos de tipo *Stone Matrix Asphalt (SMA)*, concreto asfáltico permeável e poliuretano, também permeável. Para a etapa de uso, os autores avaliaram o consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa para diferentes valores de índice internacional de rugosidade (*IRI*, em inglês) e de volume médio anual de tráfego diário (*AADT*, em inglês), de modo a compreender os efeitos do revestimento para os impactos do consumo de combustível dos veículos.

Como conclusão, Lu *et al.* (2019) comentam que durante o uso da via a rugosidade tem a tendência de aumentar e impactar no consumo de combustível, com consequente maior impacto nas emissões de gases de efeito estufa. O pavimento de poliuretano se demonstrou o mais benéfico ambientalmente e o pavimento de concreto

asfáltico permeável não apresentou redução do consumo energético e emissões durante o escopo global da ACV em relação ao SMA. Também obtiveram como resultados os limites de *IRI*, a partir dos quais o aumento da rugosidade acarreta em grandes aumentos de consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa. Deve-se avaliar com cautela o projeto de pavimentos de modo que, em vias com alto tráfego, não seja priorizado um pavimento permeável que acarrete em alto valor de consumo pela rugosidade. Por fim, citam que em estudos futuros deve-se abordar tanto o escopo da rugosidade como os benefícios acarretados pela permeabilidade do sistema.

Fathollahi e Coupe (2021) realizaram uma pesquisa comparativa, por meio da ACV e ACCV, de dez tipos de sistemas de drenagem urbana, incluindo pavimentos permeáveis. Os autores tinham como objetivo comparar ambientalmente e economicamente os tipos mais usuais de drenagem urbana e entender quais fatores influenciam na análise, de modo a auxiliar os projetistas a escolherem as melhores técnicas. Como resultados, os sistemas com o maior uso de matéria prima foram os mais impactantes, como o sistema usual de drenagem com o uso de sarjetas e galerias e alguns SUDS como pavimentos permeáveis. O uso de sistemas com menor quantidade de matéria prima adicional, como as valetas naturais (*bioswales*) e reservatórios de retenção (*retention pond*), foram os menos impactantes. Reitera-se que os pavimentos permeáveis possuem a função de tráfego de veículos, fator não apresentado pelas demais técnicas e não inserido nas fronteiras de análise da ACV e ACCV.

Liu *et al.* (2020) realizaram a ACV de diferentes modelos de pavimentos com o uso de concreto asfáltico permeável em comparação ao concreto asfáltico denso. O escopo feito pelos autores para a pesquisa considerou os impactos das etapas de extração de materiais, construção, uso e manutenção. Para a etapa de uso foram analisados os efeitos relacionados à resistência de rolagem, à distância adicional percorrida em casos de inundação, ao uso da água infiltrada na irrigação com a diminuição da demanda de água potável e também do efeito do aumento de albedo nos pavimentos permeáveis. Comentam que o maior albedo é equivalente à redução de gases de efeito estufa, e, no estudo de caso, encontraram redução equivalente a 553 toneladas de dióxido de carbono pelo aumento do albedo no concreto asfáltico permeável. A análise de albedo realizada pelos autores é condicionada à redução das ilhas de calor urbano por meio da regulação da energia radiativa com reflexão.

De modo geral, com a avaliação das ICU, da resistência à rolagem, da melhoria de qualidade e uso da água infiltrada, concluiu-se que os pavimentos permeáveis são menos impactantes ambientalmente. Para todas as métricas de avaliação (consumo de energia, potencial de aquecimento global, de formação de poluição, de acidificação e de toxicidade humana) o uso de revestimentos permeáveis foi menos impactante, porém a um custo maior de produção. Por fim, ao converter os impactos ambientais em custos, por meio de coeficientes de correspondência, os autores concluíram que a

utilização de revestimentos permeáveis foi mais benéfica.

Percebe-se que as pesquisas sobre o tema têm incorporado diferentes efeitos da fase de uso, como a análise dos efeitos nas ICU, na melhoria da qualidade da água de escoamento, redução de ruído, redução da drenagem convencional, entre outros. Também se percebe que existem vários modelos de pavimentos permeáveis, com diferentes espessuras, materiais e usos. As pesquisas encontradas se complementam em termos de escopo de análise, com poucos dos estudos encontrados avaliando as diversas características obtidas por meio de um sistema de pavimentos permeáveis. Liu *et al.* (2020) foi o trabalho encontrado com o maior número de efeitos da fase de uso incorporados, almejando incorporar os benefícios obtidos por meio do sistema de pavimentos permeáveis.

Em relação aos programas, bancos de dados e métodos de AICV, percebe-se haver similaridade com as tendências da literatura obtidas na Tabela 3. O programa mais utilizado mantém-se o *Simapro*, seguido do *Gabi*. Em relação ao banco de dados percebe-se haver grande uso do *Ecoinvent*, seguido do *Gabi database*. Por fim, em relação aos métodos de AICV, mantém-se o majoritário uso do método *ReCiPe*, seguido de *IMPACT 2002+*, *Traci 2.1*, entre outros. Em relação aos revestimentos avaliados, quinze avaliaram o uso de asfalto permeável, quatorze avaliaram o uso de concreto permeável e um avaliou o uso de pavimento permeável de poliuretano. Outros tópicos interessantes em relação aos revestimentos dizem respeito às incorporações, como o uso de agregados reciclados e diferentes tipos de aditivos. Interessa-se também compreender o uso e durabilidade pretendidos de cada estudo, de modo que se possa também atingir otimização ambiental com o desempenho adequado.

2.3.2.3 ACV de sistemas de captação de água pluvial por pavimentos permeáveis

Por fim, são apresentados os estudos de ACV que incorporam o uso de pavimentos permeáveis e de captação de água pluvial para uso em edificações. Foram encontrados quatro principais trabalhos no assunto, com três deles desenvolvidos na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Demais trabalhos encontrados avaliam a ACV da qualidade da água infiltrada ou avaliam quantitativamente sistemas similares, porém a união de captação de água pluvial, pavimentos permeáveis e ACV somente foi obtida nestas quatro pesquisas. Do quarto protocolo de pesquisa na Tabela 4 foram obtidos seis resultados, dos quais cinco estavam disponíveis em forma de texto completo e quatro avaliavam especificamente sistemas de captação de água pluvial por meio de pavimentos permeáveis, sendo eles: Li *et al.* (2018), Martins Vaz *et al.* (2020), Antunes *et al.* (2020a) e Antunes *et al.* (2020b).

Li *et al.* (2018) foram citados anteriormente na Tabela 3 por realizarem a ACV de diferentes tipos de sistemas de captação de água pluvial, dentre os quais avaliaram telhados verdes e pavimentos permeáveis. O objetivo dos autores era de obter

a otimização multi-objetiva do sistema com funções de: volume de água pluvial captado, volume de água pluvial em escoamento controlado, custo do sistema e impacto ambiental, avaliado por meio da função de potencial de depleção abiótica fóssil que refere-se à utilização de recursos fósseis não renováveis na terra. A ACV realizada considerou as etapas de construção, operação e manutenção e disposição final dos sistemas, dentre os quais foram inseridos parâmetros qualitativos da água e o efeito de melhoria. Em relação às publicações da Tabela 4, percebe-se que Li *et al.* (2018) não consideraram efeitos de ICU, de operação de veículos, de sonoridade, entre outras características, limitando-se a analisar a otimização multi-objetiva com a ACV de escopo específico. Sobre o sistema de captação de água pluvial, a utilização das três áreas de captação somadas (telhados verdes, pavimentos permeáveis e espaços naturais) foi capaz de fornecer 14,7% da demanda de água residencial de Beijing, China, e de controlar 78,5% da pluviometria local.

Martins Vaz *et al.* (2020) realizaram o primeiro trabalho que juntou os princípios da ACV com o uso de pavimentos permeáveis para captação de água pluvial. Os autores realizaram a Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e a ACCV dos sistemas por meio de uma série de equações e o uso de dados de trabalhos anteriores. O objetivo foi de comparar diferentes modelos de pavimentos permeáveis utilizados em sistemas de captação de água pluvial, bem como avaliar as fases de maior impacto e a viabilidade econômica do sistema. Como objetivos secundários os autores avaliaram diferentes modelos de dimensionamento hidráulico-hidrológico do sistema e diferentes espaços temporais de análise, de modo a comparar a série histórica com o último ano de precipitação.

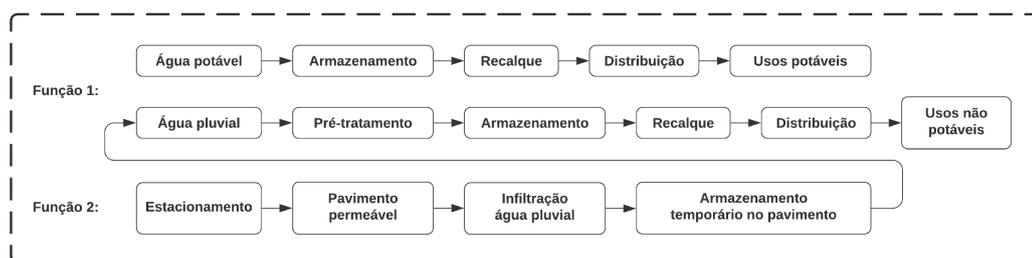
Em relação à avaliação energética, os autores obtiveram como resultado que a fase de construção e obtenção de materiais foi a mais dispendiosa, principalmente devido aos materiais betuminosos e aos agregados. Também se cita que os materiais plásticos, principalmente utilizados para a impermeabilização do subleito e tubulações, são responsáveis por parte impactante do consumo energético, de modo a interessar ao projetista a otimização de traçados e consumo de plásticos no projeto. Ao analisar comparativamente ao sistema usual de pavimentação, o pavimento obteve viabilidade econômica, comprovada por meio do Valor Presente Líquido (VPL) e *payback* descontado. A análise realizada pelos autores também não considerou a comparação com o sistema usual de drenagem, o qual aumentaria o retorno financeiro por meio da diminuição dos custos de drenagem local.

Antunes *et al.* (2020a) avaliaram ambientalmente um sistema de captação de água pluvial por meio de pavimentos permeáveis para usos não-potáveis em edificações. A comparação foi realizada em relação a um sistema usual de drenagem, sarjetas e bocas de lobo, e de fornecimento hídrico, água potável da concessionária local de Florianópolis. Os sistemas foram caracterizados nas fases de construção, uso

e operação e disposição final. As Figuras 20 e 21 mostram a fronteira de análise dos dois cenários avaliados por Antunes *et al.* (2020a). Ressalta-se que os modelos de pavimento avaliados pelos autores em ambos os sistemas das Figuras 20 e 21 são compostos por revestimento asfáltico permeável.

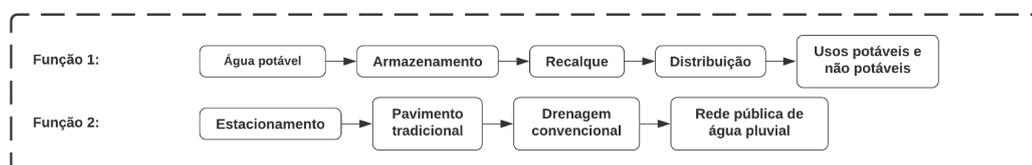
Como resultado os autores obtiveram que o cenário com pavimento permeável foi capaz de obter menores impactos ambientais em todas as categorias *midpoint* do método *ReCiPe*, com exceção da depleção de recursos naturais. A capacidade de suprir 69,6% da demanda total de água da edificação também foi um resultado promissor, principalmente alinhado às medidas de edificações públicas possuírem grande parte de demanda não-potável. Também obtiveram reduções energéticas durante a fase de operação do sistema, ao passo que se gasta menos energia fornecendo água pelo sistema do pavimento em comparação ao fornecimento hídrico potável da concessionária local.

Figura 20 – Fronteira de análise do cenário com pavimento permeável e captação de água pluvial.



Fonte: Antunes *et al.* (2020a).

Figura 21 – Fronteira de análise do cenário com pavimento convencional e drenagem tradicional.



Fonte: Antunes *et al.* (2020a).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados os principais tópicos encontrados na literatura em relação à captação de água pluvial, pavimentos permeáveis, análise de ciclo de vida e publicações que envolvam os três temas. O objetivo é de inteirar o leitor acerca

do estado da arte atual, bem como posicionar a pesquisa dentro da coletânea internacional de publicações e contextualizar sua importância. Neste sentido foram abordados também tópicos referentes às mudanças climáticas e pesquisas nacionais e internacionais em prol da resiliência do espaço urbano ao clima futuro. Os problemas devem ser respondidos por meio de coordenação entre os diferentes entes envolvidos, e a pesquisa é parte fundamental para auxílio aos tomadores de decisão acerca da sustentabilidade dos sistemas adotados.

Em relação à união dos três principais temas envolvidos nesta pesquisa, ACV, pavimentos permeáveis e captação de água pluvial, poucos estudos foram encontrados na literatura, sobretudo com a maior relevância das pesquisas realizadas pela UFSC. Porém, percebe-se haver crescente interesse da comunidade científica e de aplicação dos temas individualmente, com dispersão mundial nas publicações encontradas. Desse modo, acredita-se que esta pesquisa e o interesse da UFSC quanto à captação de água pluvial por diferentes meios são de total relevância para a comunidade mundial e para o combate às mudanças climáticas nos centros urbanos.

3 MÉTODO

O estudo foi realizado de modo a comparar ambientalmente diferentes modelos de captação de água pluvial, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Foram avaliados sistemas com o uso de pavimentos permeáveis e telhados como áreas de captação de água pluvial, bem como fornecimento hídrico potável por meio de sistema convencional. Focou-se em compreender as diferentes etapas do ciclo de vida, de modo a abranger os diferentes efeitos do sistema e possíveis benefícios e impactos positivos gerados pelos sistemas descentralizados de fornecimento hídrico. Nas próximas seções são explicadas as características dos sistemas, as considerações de análise e os programas computacionais utilizados para as simulações.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO MÉTODO

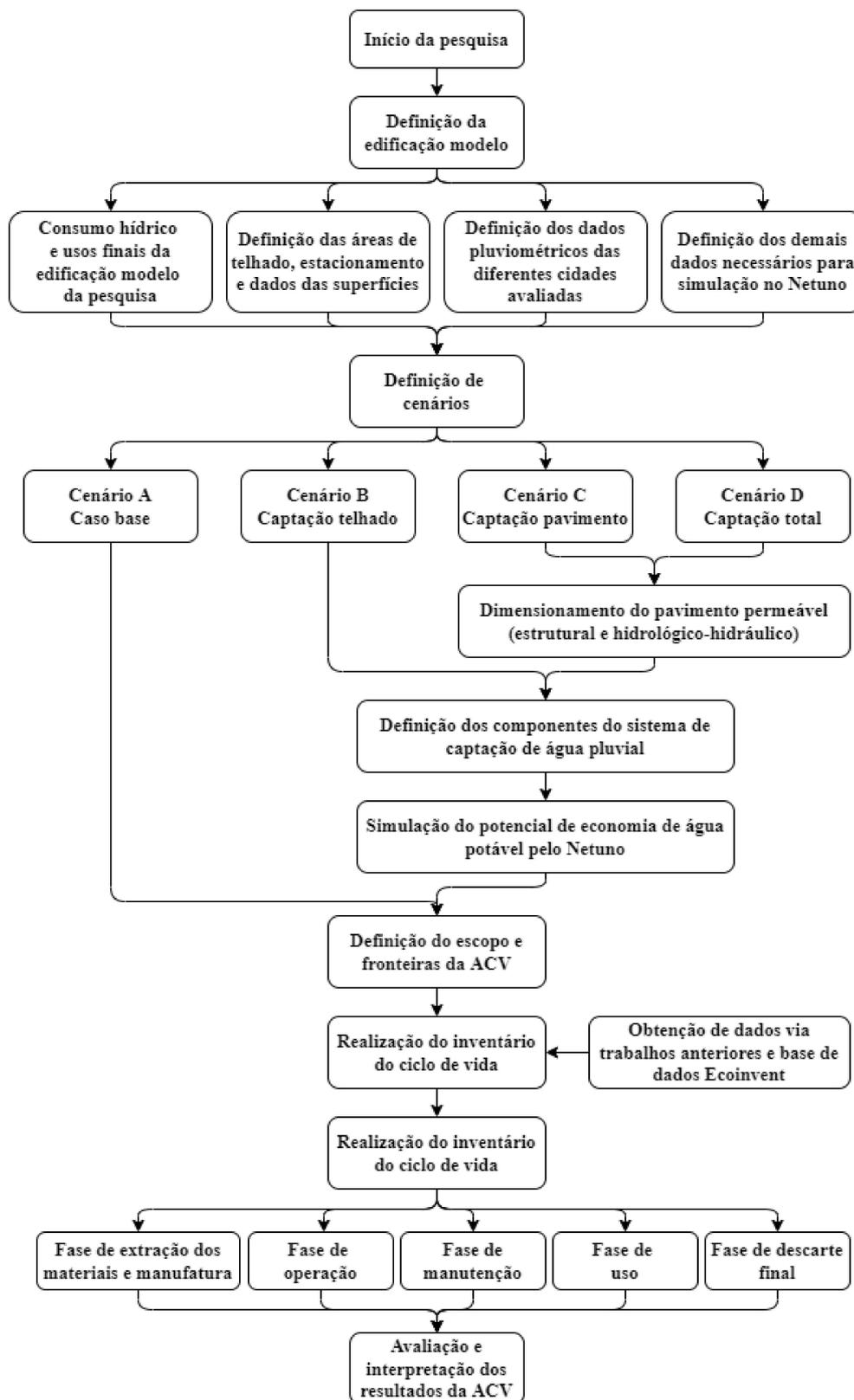
A metodologia proposta para esta pesquisa tem como principal objetivo avaliar ambientalmente diferentes modelos de captação de água pluvial para universidades. Dentre os cenários propostos foram avaliadas a utilização de telhados e pavimentos permeáveis como áreas de captação, bem como os diferentes benefícios incorporados pelos usos das técnicas. Desse modo foram propostos quatro cenários iniciais, com a incorporação de diferentes combinações dos modelos de captação de água pluvial por telhados e pavimentos permeáveis. Os cenários envolvendo pavimentos permeáveis foram também segregados em dois tipos, com revestimento em concreto permeável e asfalto permeável, de modo que foram totalizados seis diferentes sistemas de captação avaliados.

Uma vez definidos os cenários físicos de captação, fez-se simulações de potencial de economia de água potável para seis cidades brasileiras, de modo a compreender as diferenças entre os resultados obtidos no balanço hídrico. O potencial de instalação dos sistemas foi discutido, bem como as diferenças entre os cenários e os revestimentos utilizados. Durante essa etapa foram dimensionados os sistemas e avaliados os diferentes parâmetros de simulação, de modo a poder discutir as diferenças entre os cenários.

Com a finalização da primeira etapa do método, fez-se a ACV dos quatro cenários e dois revestimentos para a cidade de Florianópolis, por meio de metodologia baseada em trabalhos similares (MARINOSKI; GHISI, 2019; ANTUNES *et al.*, 2020a). O trabalho baseou-se nos procedimentos citados nas normas NBR 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b), conforme padronização nacional da metodologia. Foram utilizados três principais programas para realização do estudo, dentre os quais: Netuno, para simulação do potencial de economia de água potável; *Permeable Design Pro* para dimensionamento do pavimento permeável e *OpenLCA* para cálculo da ACV. Desse modo, espera-se poder discutir potenciais melhorias para os sistemas, bem como

discutir o potencial de uso de captação de água descentralizada em universidades pelo Brasil. Mais detalhes são apresentados na seção de ACV. A Figura 22 mostra o fluxograma do método e os cenários avaliados.

Figura 22 – Fluxograma do método utilizado.



3.2 CENÁRIOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL

O método foi desenvolvido de modo a comparar os possíveis impactos ambientais de seis diferentes cenários de fornecimento hídrico para uma edificação universitária modelo. O primeiro cenário é o convencional, chamado caso base, no qual ocorre a drenagem da pluviometria incidente no telhado e estacionamento por meio de galerias urbanas de drenagem, e o fornecimento hídrico por meio de água potável da concessionária local. Dá-se o nome de Cenário A - Caso base, pois é o modelo padrão de drenagem e fornecimento hídrico, servindo de comparação para os demais modelos avaliados. A Figura 23 mostra o cenário A.

O segundo cenário avaliado é o de captação de água pluvial por meio de telhado. A água captada nos telhados é destinada aos usos não-potáveis da edificação, com fornecimento hídrico complementar potável por meio da concessionária local. Neste caso, a drenagem do telhado é associada ao sistema de captação, somente direcionando a parte excedente para a drenagem urbana. A precipitação incidente sobre o estacionamento da edificação é totalmente direcionada para o sistema de drenagem local. Dá-se o nome de Cenário B - Captação telhado, com os detalhes apresentados na Figura 24.

O terceiro cenário avaliado é o de captação de água pluvial por meio de pavimentos permeáveis. A água captada no pavimento permeável é destinada aos usos não-potáveis da edificação, com fornecimento hídrico complementar potável por meio da concessionária local. Neste caso, a drenagem do pavimento é associada ao sistema de captação, somente direcionando a parte excedente para a drenagem urbana. A precipitação incidente sobre o telhado da edificação é totalmente direcionada para o sistema de drenagem. Dá-se o nome de Cenário C - Captação pavimento, com detalhes apresentados na Figura 25. O Cenário C também é desmembrado em dois subgrupos, contendo o revestimento em concreto permeável e asfalto permeável, de modo a compreender as diferenças entre ambos os tipos de revestimentos. Quando utilizado o termo Cenário C, sempre será indicado em seguida o tipo de revestimento, sendo Cenário Cc com concreto permeável ou Cenário Ca com asfalto permeável.

Por fim, o quarto cenário é o de captação por meio de ambas as áreas disponíveis, telhado e estacionamento. A água captada no último cenário é toda destinada para uso não-potável da edificação, com o excedente extravasado para a drenagem urbana local. Dá-se o nome de Cenário D - Captação total, conforme detalhes apresentados na Figura 26. Para este cenário também fez-se a separação em Cenário Dc com concreto permeável e Cenário Da com asfalto permeável, similarmente ao anterior. Os quatro cenários avaliados não são existentes na prática, sendo portanto uma avaliação teórica dos modelos e seus respectivos potenciais impactos ambientais.

Todos os cenários avaliados têm em comum a mesma edificação modelo, com respectivo estacionamento e condições locais de drenagem. Desse modo, o primeiro

passo executado foi definir uma edificação pública universitária para ser utilizada como modelo para a criação dos modelos simulados. Com a definição da edificação modelo, foram definidas cidades brasileiras para a incorporação do estudo, levando-se em consideração trabalhos similares de avaliação da captação de água pluvial no Brasil (ISTCHUK, 2021). Para todos os cenários avaliados também se fez necessário projetar a pavimentação do estacionamento, seja permeável ou impermeável. Atentou-se para projetar de modo que o desempenho estrutural apresentado fosse similar em todos os cenários. O desempenho hidráulico do pavimento permeável também foi averiguado entre os cenários, de modo a garantir a eficiência da drenagem.

Com as características da edificação, do pavimento e da drenagem local, pode-se obter os demais dados necessários para a avaliação do potencial de economia de água potável. Para tal foi utilizado o programa computacional Netuno, versão 4 (GHISI; CORDOVA, 2014). Dentre as variáveis utilizadas cita-se a precipitação local, variada entre as cidades brasileiras simuladas, consumo hídrico da edificação, percentual de usos não-potáveis, volume dos reservatórios simulados, entre outros. Por meio do sistema de uso de água pluvial também foi possível estimar a energia necessária para as motobombas da edificação.

Em sequência à averiguação de todos os cenários de captação, com dimensionamento e simulação para todas as cidades e parâmetros selecionados, fez-se a comparação ambiental por meio da ACV. Foi utilizado o programa *OpenLCA* (GREENDELTA, 2021) juntamente com dados de pesquisas anteriores e o banco de dados *Ecoinvent 3.8* (WERNET *et al.*, 2016). Definiu-se uma unidade funcional similar aos quatro cenários e escolheu-se a cidade de Florianópolis para a avaliação ambiental.

Figura 23 – Cenário A - Caso base (Sem captação de água pluvial e com pavimento convencional).

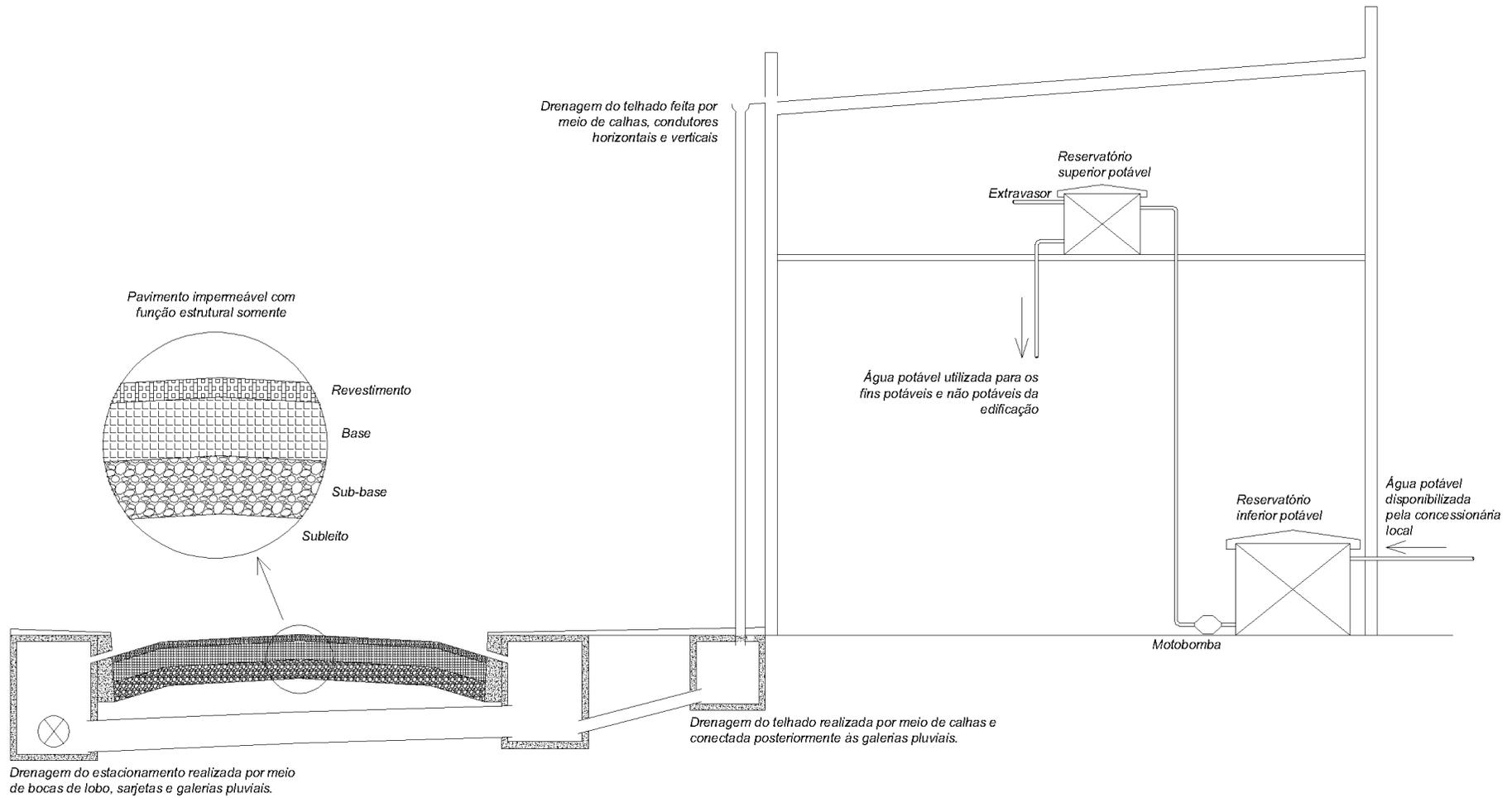


Figura 24 – Cenário B - Captação telhado (Com captação de água pluvial pelo telhado e pavimento convencional).

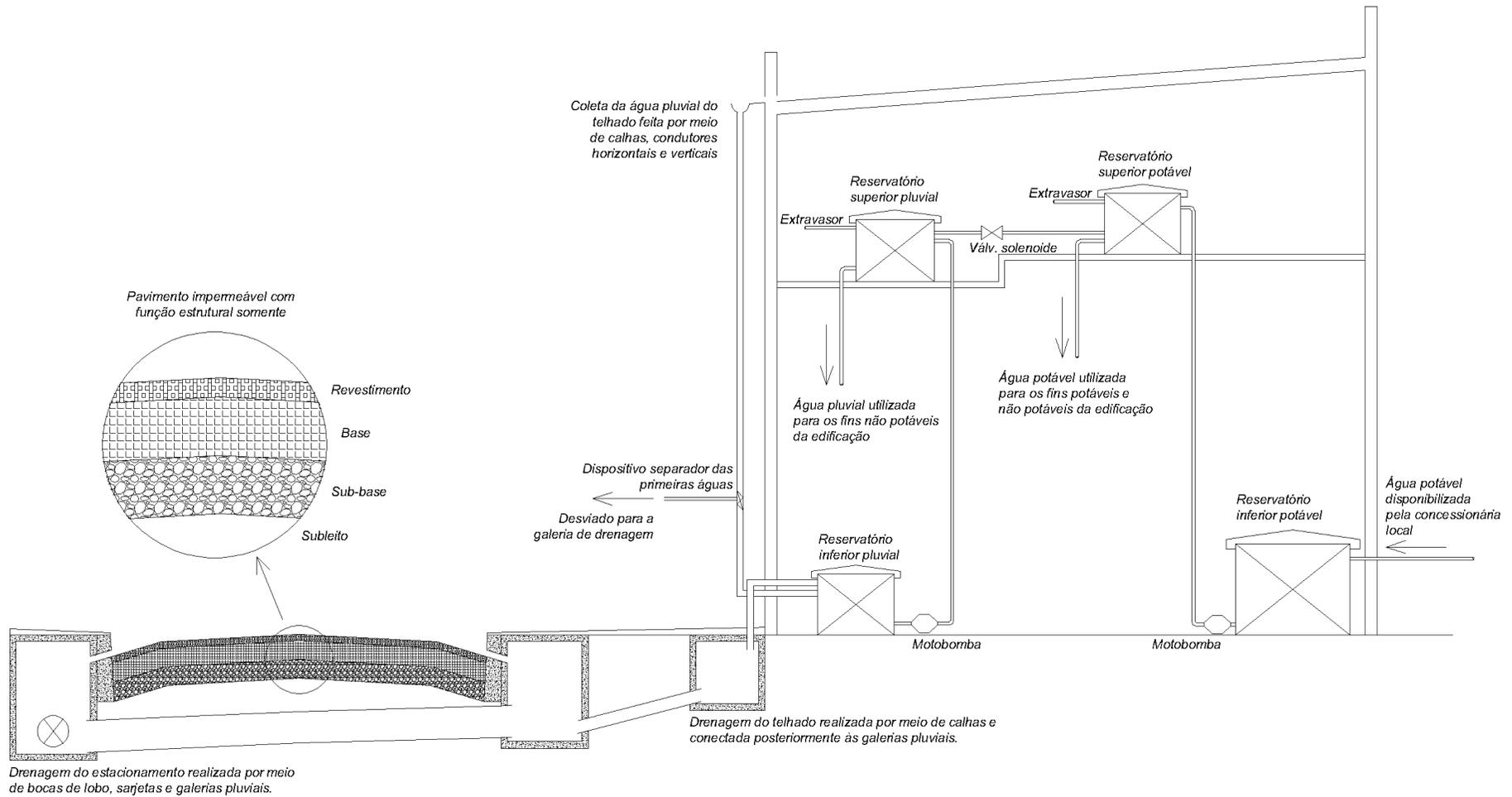


Figura 25 – Cenário C - Captação pavimento (Com captação de água pluvial pelo pavimento permeável e drenagem do telhado).

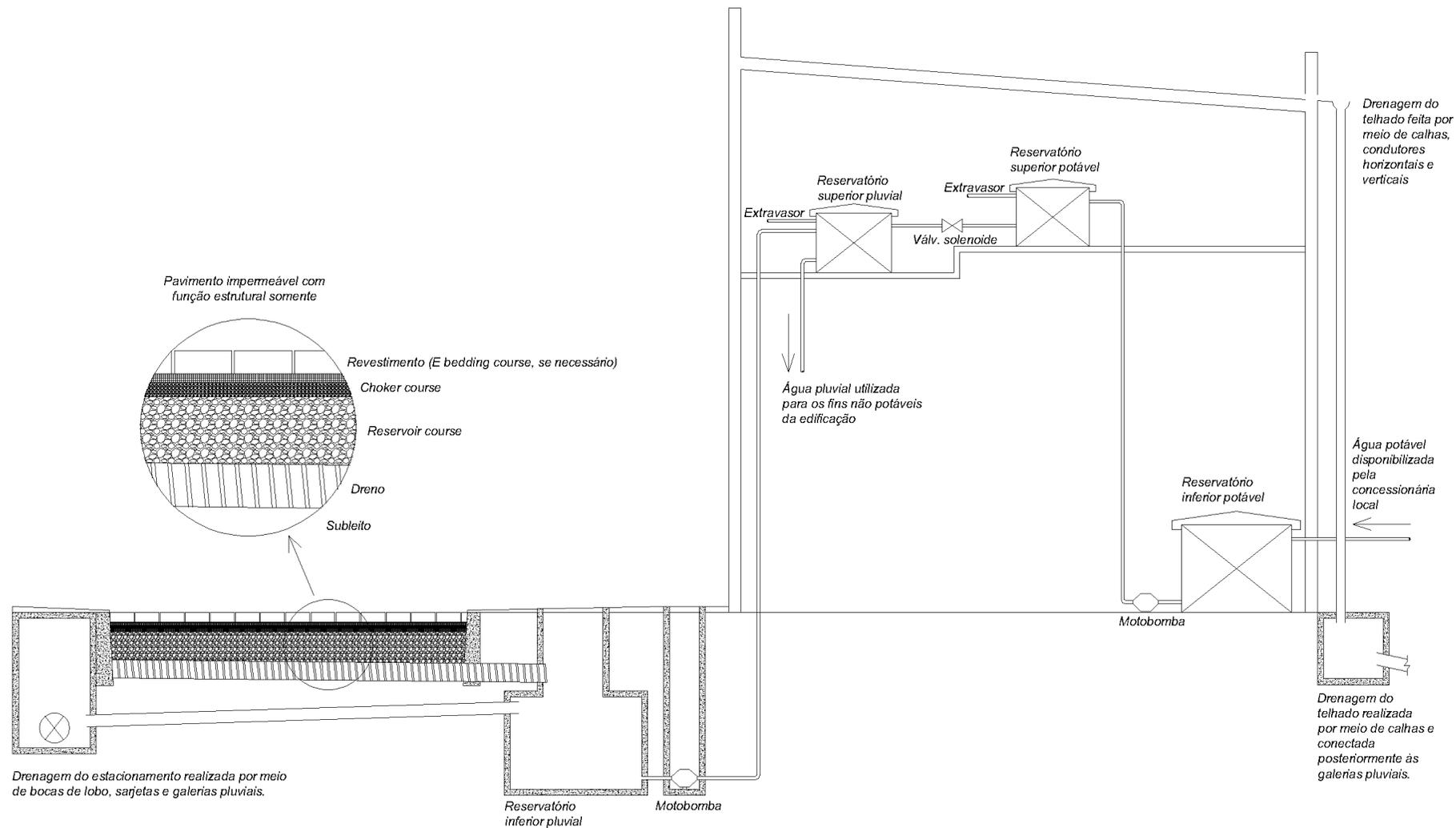
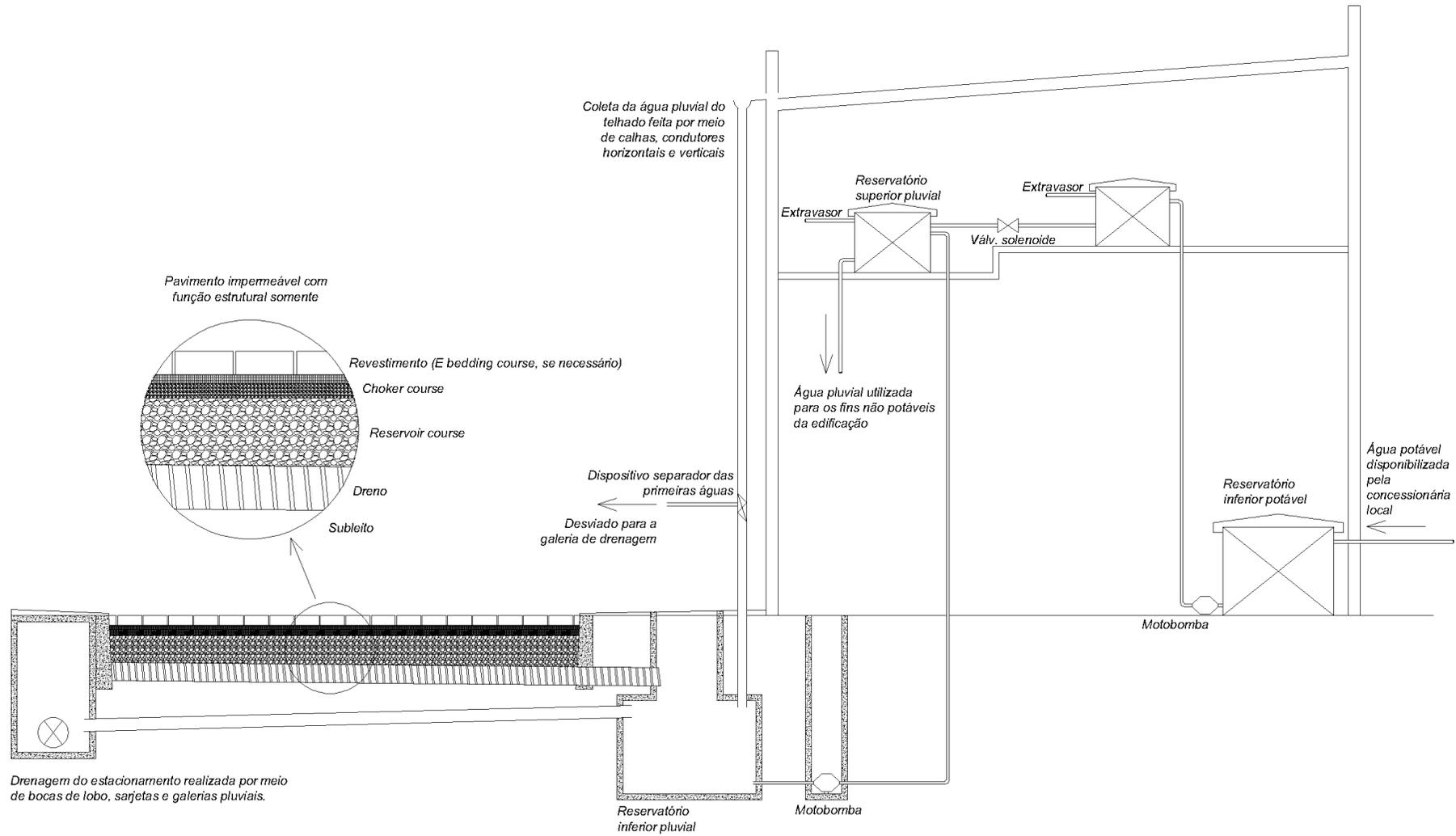


Figura 26 – Cenário D - Captação total (Com captação de água pluvial pelo pavimento permeável e pelo telhado).



3.3 OBJETO DE ESTUDO

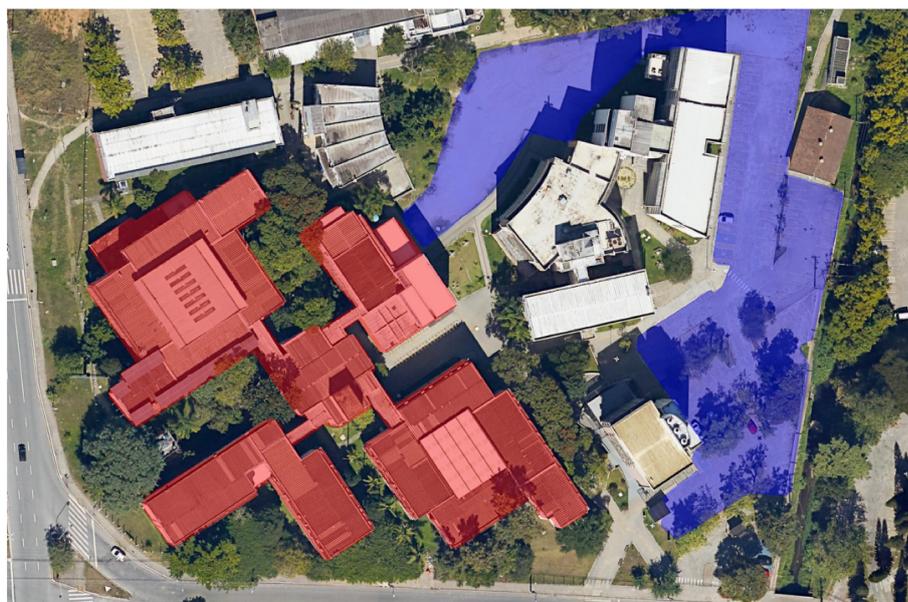
Como primeiro passo do método, tem-se a definição da edificação modelo e características para dimensionamento e projeto dos sistemas propostos. As seguintes subseções focam na escolha de uma edificação universitária, características presentes na edificação e os detalhes definidos para o projeto de captação de água pluvial.

3.3.1 Edificação modelo

A edificação modelo escolhida é o conjunto de cinco blocos do centro tecnológico (CTC) da UFSC. A escolha baseou-se nos critérios de ser uma edificação universitária com usos majoritariamente não-potáveis. Também optou-se pelo conjunto de blocos do CTC por estarem disponíveis os consumos hídricos de pelo menos três anos, previamente à pandemia do Corona Vírus.

O conjunto de edifícios está localizado na rua Delfino Conti, Trindade, Florianópolis, Santa Catarina. Todos os cinco blocos avaliados possuem três pavimentos, com usos diversos entre salas de aula, laboratórios e escritórios. Cita-se que todos os cinco blocos possuem banheiro e bebedouros dentro das dependências. A área em projeção dos cinco blocos é de aproximadamente 5.350 m², com área total de aproximadamente 15.000 m². A Figura 27 mostra uma foto aérea do objeto de estudo e o estacionamento da edificação, em conjunto.

Figura 27 – Edificação modelo escolhida para o estudo.



Legenda: Em vermelho os blocos do CTC e em azul as possíveis áreas para instalação de pavimentos permeáveis.

Reitera-se que foram escolhidos os cinco blocos do CTC por similaridade de usos finais hídricos e capacidade de modelagem do sistema de captação de água

pluvial diretamente na edificação beneficiada. Também se optou por não delimitar áreas adicionais de pavimento permeável além das áreas existentes de estacionamento no local, de modo a não modificar o uso e ocupação do solo. Demais características dos pavimentos e telhados existentes foram obtidas de modo a validar o objeto de estudo.

Outro motivo para escolha da edificação modelo é a possibilidade de comparar os resultados obtidos com os propostos por meio da empresa RainMap (2017). RainMap (2017) avaliou o potencial de economia de água potável por meio da instalação de captação de água pluvial no conjunto de blocos do CTC. O estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade econômica da implantação, bem como propor o cenário ideal dadas as possibilidades de áreas de captação.

3.3.2 Estacionamento e telhados

A área total de estacionamento no objeto de estudo é de 5.500 m², dos quais 1.700 m² estão em leito natural e 3.800 m² estão em pavimentação com bloco hexagonal de concreto. Para o sistema proposto, baseia-se no projeto teórico do estacionamento, de modo que seja refeita a pavimentação com revestimento, base e sub-base. Ou seja, contempla-se uma análise comparativa de projeto, desconsiderando o material existente no local. Como demais características para projeto tem-se o volume de tráfego, definido em 100.000 Eixos Simples Padrão (ESP) conforme analisado por Martins Vaz *et al.* (2021b) e Antunes *et al.* (2020a) para vias de tráfego leve, e a troca do subleito por material de Índice de Suporte Califórnia (ISC) igual a 5,0, conforme requisitos mínimos dos manuais de pavimentos permeáveis (MARTINS VAZ *et al.*, 2021b; WOODS-BALLARD *et al.*, 2011).

Os telhados dos cinco blocos são construídos em laje com telhas de fibrocimento em leve inclinação (RAINMAP, 2017). Os sistemas atuais de captação pluvial constam de calhas de concreto e condutores verticais, com manutenção periódica para limpeza e retirada de galhos que possam obstruir o sistema. Tem-se a possibilidade de captar grande parcela da água incidente e utilizar para fins não-potáveis, conforme proposto no sistema de captação de água pluvial.

3.3.3 Localidades

As localidades escolhidas para o projeto estão condicionadas à representatividade de pluviometria, conforme avaliado por Istchuk (2021), e a presença de universidades públicas. O objetivo é garantir a representatividade do estudo em relação aos diferentes padrões pluviométricos brasileiros, bem como auxiliar na escolha de modelos descentralizados de captação de água pluvial em edificações universitárias. Desse modo, foram escolhidas seis cidades com dados obtidos via Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2019). Tem-se a escolha de Belo Horizonte, Brasília,

lia, Florianópolis, Manaus, Salvador e São Paulo. As cidades e características estão descritas no Apêndice A.

3.3.4 Consumo hídrico e usos finais de água

O consumo hídrico foi obtido por meio dos monitoramentos do grupo UFSC-Sustentável (SERGIO, 2022). Os dados de consumo hídrico estão disponíveis em base mensal, desde 2013, separados pelos diferentes hidrômetros sob controle da UFSC. O hidrômetro correspondente ao bloco do CTC é o H033, e os dados foram selecionados de modo a representar consumos prévios à pandemia do Corona Vírus.

Os usos finais correspondem ao detalhamento dos consumos hídricos do local, e servem para compreender as necessidades qualitativas da água fornecida. Foram utilizados como referência os estudos citados na Tabela 1. Para edificações públicas têm-se usualmente valores de usos finais não-potáveis entre 70 e 80%, sendo assumido o valor médio de 75% como a referência para este estudo. Em relação aos possíveis usos da água pluvial captada, a NBR 16783 (ABNT, 2019b) indica como possível uso a descarga de bacias sanitárias, lavagem de pátios, irrigação e usos ornamentais, entre outras destinações avaliadas pelo projetista.

3.3.5 Dados pluviométricos e curvas IDF

Os dados pluviométricos utilizados para a pesquisa estão divididos em dois tipos: precipitação diária e curvas IDF. A precipitação diária é utilizada para simulação do balanço hídrico da edificação, de modo a avaliar o potencial de economia de água potável. Para esse dado foi utilizado o sistema brasileiro do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET, 2021). O banco de dados consta de estações meteorológicas automatizadas e manuais em toda a extensão do país. Foi optado por utilizar os pluviômetros convencionais do BDMEP, uma vez que apresentam menor quantidade de falhas de medição dos dados. As falhas foram preenchidas por zero milímetros, uma vez que foram poucos dias e a escolha disponibiliza menor volume hídrico para o sistema, condicionado a uma situação mais conservadora em termos de potencial de economia de água potável. Para as seis cidades avaliadas, foram utilizados os respectivos pluviômetros como referência, com dados entre 1^o de janeiro de 2003 a 1^o de janeiro de 2020. No Apêndice A é mostrado o número de referência do pluviômetro de cada cidade.

A curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) é um modelo de representação das características de eventos extremos de precipitação, e serve para o dimensionamento de estruturas de drenagem e contenção. Por meio da equação da curva IDF, do tempo de recorrência e da duração da chuva de projeto, pode-se obter a intensidade pluviométrica da precipitação extrema, a qual serve para modelagem da vazão a ser admitida nas estruturas de drenagem. Dentre demais características, cita-se que a

curva IDF é variável com o tempo, uma vez que as mudanças climáticas têm modificado os padrões pluviométricos (COSTA *et al.*, 2020). Em relação às demais variáveis citadas, o tempo de recorrência é uma variável hidrológica responsável por indicar o inverso da probabilidade de um evento ser igualado ou excedido. Ou seja, tem-se a inserção do fator de probabilidade associado, dada que a modelagem hidrológica de precipitação está relacionada a um evento estocástico. Por fim, a duração da chuva de projeto é o intervalo de tempo de referência, também definido de acordo com normativas e boas práticas de drenagem. A Equação 1 (BACK; BONETTI, 2014) mostra o modelo padrão de curva IDF utilizado no Brasil.

$$i = \frac{K \times T^m}{(t + b)^n} \quad (1)$$

Onde: i é a intensidade média máxima pluviométrica (mm/hora); K , b , n e m são parâmetros de acordo com as características pluviométricas do local (adimensional); T é o período de recorrência do projeto (anos); t é o tempo de duração da chuva de projeto (minutos).

Os dados utilizados para IDF foram obtidos por meio de publicações das seis cidades estudadas. A Tabela 5 mostra os coeficientes utilizados e a fonte dos dados para cada cidade. Foram obtidas equações IDF atuais, de pesquisas sobre séries históricas, porém nos resultados são discutidos potenciais modificações por meio do aumento da intensidade e frequência de precipitações extremas.

Tabela 5 – Fonte dos parâmetros das curvas IDF utilizadas no estudo

Cidade	Fonte	Variáveis			
		K	m	b	n
Manaus	Monteiro e Braga (2018)	1102,3	0,115	09,8	0,724
Salvador	Santana <i>et al.</i> (2020)	1097,9	0,163	10,1	0,728
Florianópolis	Back e Bonetti (2014)	1168,5	0,238	09,1	0,703
Brasília	ADASA (2018)	1574,7	0,207	11,0	0,884
São Paulo	PMSP (2012)	-	-	-	-
Belo horizonte	Nascimento <i>et al.</i> (2020)	2482,0	0,125	20,0	0,897

Sabe-se que a mudança na intensidade e pluviometria varia espacialmente pelo Brasil, o que dificulta a criação de algoritmos simples para correção de tendências nas seis diferentes localidades. Somente para o caso de São Paulo tem-se um modelo de equação IDF diferente, conforme proposto pelo manual de drenagem da cidade (PMSP, 2012). A Equação 2 (PMSP, 2012) mostra a curva IDF para a cidade de São Paulo.

$$i = 39,3015 \times (t+20)^{-0,9228} + 10,1767^{-0,8764} \times [-0,4653 - 0,8407 \times \ln(\ln \frac{T}{T-1})] \quad (2)$$

Onde: i é a intensidade média máxima pluviométrica (mm/min); T é o período de recorrência do projeto (anos); t é o tempo de duração da chuva de projeto (minutos).

Por fim, também foram avaliadas as mudanças climáticas de modo a melhor discutir os resultados e potenciais alterações da ACV proposta. Para tal, foi realizada a comparação da precipitação atual e futura de acordo com o modelo de Santos (2018). O percentual de alteração da pluviometria mensal foi obtido por meio do modelo de Santos (2018), e aplicado nos dados pluviométricos médios obtidos para as cidades avaliadas. O código dos pluviômetros utilizados na pesquisa é apresentado no Apêndice A. Os resultados finais apresentaram as variações da precipitação mensal, para cada um dos doze meses do ano, e média anual. Pode-se, dessa forma, avaliar futuras mudanças nos resultados de potencial de economia de água potável e consequentes mudanças nos impactos potenciais obtidos na ACV.

3.3.6 Simulação do potencial de economia de água potável

A simulação do potencial de economia de água potável foi realizada por meio do programa computacional Netuno, versão 4 (GHISI; CORDOVA, 2014). O programa Netuno realiza simulações de captação de água pluvial e uso em edificações. O método utilizado pelo programa realiza simulações com base no modelo comportamental, com variáveis definidas e cálculo do balanço diário de água pluvial disponível. Desse modo, não são utilizados modelos probabilísticos ou estocásticos para a simulação, baseando-se em séries históricas de precipitação.

A simulação realizada levou em consideração os usos finais da água pluvial em mictórios, descarga sanitária e limpeza de pátio. Desse modo, indicou-se como percentual máximo de substituição de água potável o valor de 75%, conforme literatura. Como demais parâmetros indicados no programa tem-se: a pluviometria local, o descarte inicial, a área de captação, o coeficiente de escoamento superficial e a demanda total de água. Foram simulados diversos volumes, de modo a compreender o aumento de eficiência do sistema devido ao acréscimo do volume de reservatório de água pluvial.

Os dados pluviométricos utilizados na pesquisa foram obtidos junto ao INMET (2021), e adaptados de modo a corresponder com os requisitos de inserção do programa Netuno. O descarte inicial foi definido como dois milímetros, conforme indicação da ABNT (2019a) na falta de dados experimentais de campo. Também foram levados em consideração os resultados obtidos por Maykot (2021), os quais corroboram com

o valor de dois milímetros como descarte inicial. Não foram realizadas diferenciações entre o descarte inicial de sistemas com telhados e pavimentos permeáveis, porém espera-se que ambos obtenham qualidades iniciais diferentes. Em pesquisas futuras pode-se abordar a diferença de descarte inicial para ambos os sistemas em modelos físicos.

O descarte serve para melhorar a qualidade inicial da água captada, uma vez que esta limpa o telhado e carrega impurezas. A área de captação foi obtida com base nas áreas de telhado e estacionamento, de acordo com o respectivo cenário. Neste mesmo sentido, definiu-se o coeficiente de escoamento superficial de acordo com o tipo de área de captação, uma vez que está condicionado ao material da superfície. O valor está relacionado com o volume de água perdido por evaporação ou absorção durante a captação (GHISI; CORDOVA, 2014). Por fim, a demanda total de água serve para calcular o balanço hídrico de acordo com a quantidade de água a ser utilizada dentro da edificação.

Com as variáveis de projeto definidas, pode-se realizar a simulação do potencial de economia de água potável. A Tabela 6 mostra os parâmetros utilizados para a simulação no Netuno. Para definição do volume ideal foi utilizado o procedimento do Netuno, conforme parâmetro calculado por meio da Equação 3 (GHISI; CORDOVA, 2014). A diferença entre potenciais de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial é um parâmetro inserido no Netuno que serve como referência para o aumento de eficiência do sistema. Ou seja, o parâmetro serve como uma linha de corte para o qual o acréscimo em potencial por volume não é significativo para o projetista. Para o sistema foi definido o valor de 0,5%/m³ como linha de corte, conforme estudos similares (ANTUNES *et al.*, 2020a).

$$\frac{\Delta p_{pluv}}{\Delta V_{inf}} = \Delta_{ideal} \quad (3)$$

Onde: Δp_{pluv} é a variação no percentual de utilização de água pluvial (%); ΔV_{inf} é a variação no volume do reservatório inferior (m³); Δ_{ideal} é um parâmetro indicado pelo usuário, com nome de "Diferença entre potenciais de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial" (%/m³).

Tabela 6 – Parâmetros utilizados para simulação no Netuno.

Sistema	Cenário B	Cenário C - Asfalto	Cenário C - Concreto	Cenário D - Asfalto	Cenário D - Concreto
Dados diários de precipitação	Variável ¹	Variável ¹	Variável ¹	Variável ¹	Variável ¹
Diferença entre potenciais de economia de água potável	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Área de drenagem	5000	5000	5000	10.000	10.000
Demanda total diária de água (potável e não-potável)	Dados diários estimados a partir do hidrômetro H033				
Percentual da demanda total que pode ser substituída por água pluvial	75%				
Taxa de aproveitamento	80,0%	80,0%	88,1%	80,0%	84,1%
Volume reservatório superior	Calculado Netuno				
Volume máximo do reservatório inferior	50.000,00				
Percentual de volume no reservatório superior abaixo do qual há recalque	10%				
Descarte inicial da água pluvial	2 mm				

¹ Baseados nos pluviômetros do Apêndice A.

Por fim, a utilização de captação de água pluvial também gera redução no consumo de energia da concessionária local, ao passo que diminui a quantidade de água tratada e distribuída (ANTUNES *et al.*, 2020a). Desse modo, fez-se o cálculo da quantidade de energia economizada por meio do sistema de aproveitamento de água pluvial. A Equação 4 mostra o método proposto para cálculo da energia economizada pela concessionária. Leva-se em consideração a energia utilizada para captação, tratamento e distribuição da água potável, obtida por meio do SNIS (2020) para cada localidade avaliada e respectiva concessionária.

$$EE = CA_p \times E_{conc} \quad (4)$$

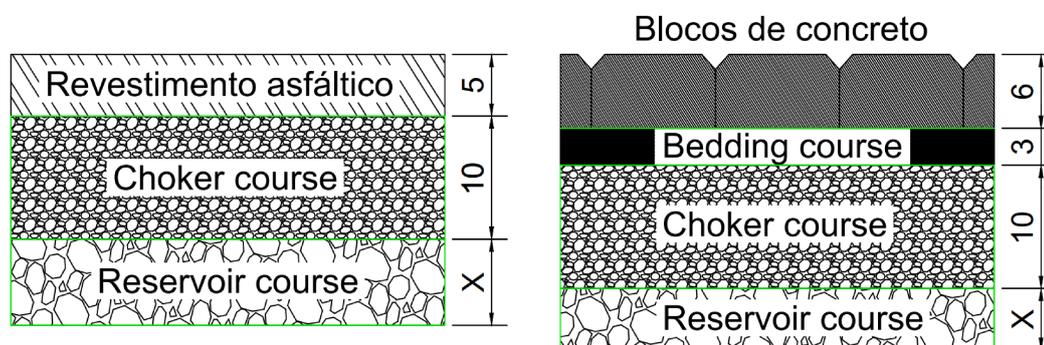
Onde: EE é o potencial de economia de energia elétrica do sistema (kWh/dia); CA_p é a quantidade de água pluvial consumida, em média, por dia (m³/dia); E_{conc} é o consumo médio de energia por m³ de água potável fornecida por meio da concessionária (kWh/m³).

3.3.7 Dimensionamento dos pavimentos

É necessário também definir o pavimento permeável utilizado nos cenários C e D e o impermeável nos cenários A e B. O pavimento permeável é usualmente constituído de três principais camadas: revestimento permeável (e camadas adicionais para o revestimento), *choker course* e *reservoir course*. Assentam-se as três camadas sobre o subleito compactado e preparado de forma similar aos pavimentos convencionais. Para sistemas de captação de água pluvial tem-se o modelo sem infiltração da NBR 16416 (ABNT, 2015), pelo qual a drenagem do pavimento é condicionada aos drenos de fundo e escoamento por gravidade para o reservatório inferior. Nesse modelo não há infiltração para o subleito, sendo necessário adicionar uma manta impermeável de PEAD para evitar infiltração para o solo.

Foram utilizados como referência os modelos sem camada filtrante de Hammes *et al.* (2018) e Ghisi *et al.* (2020), com o primeiro constituído com revestimento de asfalto permeável e o segundo por concreto permeável. Para o modelo de blocos de concreto permeável é necessário adicionar a camada de *bedding course*, responsável pelo nivelamento das peças e transição para a *choker course*. Ambos os modelos foram concebidos com o propósito de captação de água pluvial para edificações, com relação ao modelo sem infiltração ao subleito. Cita-se também que estruturalmente e hidraulicamente a única espessura a ser definida em projeto é a da camada *reservoir course*, uma vez que as demais possuem espessura pré-determinada. A Figura 28 mostra os modelos de pavimentos permeáveis utilizados na pesquisa. Cita-se também que a espessura da *choker course* foi readequada em ambos os modelos para atender os requisitos mínimos recomendados (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011), contemplando dez centímetros de espessura.

Figura 28 – Modelos de pavimento permeável utilizados no estudo (sem escala).



Dimensões em centímetros. Em verde está representado o uso de geotêxtil para separação das camadas, não utilizado no trabalho. A camada *reservoir course* terá dimensão definida posteriormente com avaliação estrutural e hidráulica do pavimento.

Fonte: Adaptado de Ghisi *et al.* (2020) e Hammes *et al.* (2018)

Os materiais utilizados para construção das camadas foram obtidos diretamente

das pesquisas de Hammes *et al.* (2018) e Ghisi *et al.* (2020). Para os revestimentos permeáveis tem-se o uso de Camada Porosa de Atrito (CPA), para o revestimento asfáltico, e blocos intertravados de concreto permeável. A CPA é constituída por agregados graníticos de 4,8 a 9,5 mm de diâmetro, pó de pedra e ligante asfáltico modificado por borracha no teor de 5% (HAMMES *et al.*, 2018). Os blocos de concreto permeável foram produzidos de acordo com as normas ABNT 16416 e 9781 (ABNT, 2015, 2013), com dimensões de 200 x 60 x 100 milímetros (Ghisi *et al.*, 2020). A *bedding course* foi produzida com agregado granítico de diâmetro entre 3,0 a 6,3 milímetros, enquanto a *choker course* foi produzida com agregados com diâmetro entre 4,75 e 25,0 milímetros. Por fim, a camada reservatório também é constituída por agregados, porém de maior tamanho, com diâmetro entre 50,0 e 75,0 milímetros. Para efeitos de cálculo da espessura da camada reservatório pelo dimensionamento hidráulico, foi adotada porosidade de 35%, de modo similar aos utilizados por Hammes *et al.* (2018), Martins Vaz *et al.* (2021b) e Antunes *et al.* (2020a).

Em relação ao valor de coeficiente de escoamento superficial, citado anteriormente como parâmetro necessário para a simulação no Netuno, diferentes valores foram adotados para os dois pavimentos. Os autores Hammes *et al.* (2018) e Ghisi *et al.* (2020) avaliaram o percentual de aproveitamento da água incidente nos pavimentos, de modo a compreender o volume de água disponível após infiltrar no pavimento. Hammes *et al.* (2018) obtiveram, em média, 80,0% de aproveitamento da água incidente ao pavimento de asfalto permeável, enquanto Ghisi *et al.* (2020) obtiveram 88,1% de aproveitamento para revestimento de concreto permeável. A diferença pode ser justificada por meio da permeabilidade, absorção e demais processos físico-químicos existentes durante o processo de infiltração no pavimento.

3.3.7.1 Dimensionamento hidráulico e da drenagem

De acordo com Martins Vaz *et al.* (2021b), o dimensionamento hidráulico é parte importante da definição da espessura das camadas. A escolha pela realização de simulações do balanço hídrico horário ou do cálculo simplificado gera diferentes espessuras necessárias. O estudo dos autores é continuação de estudo prévio que havia comprovado a existência de diferenças entre métodos simplificados, como o método de Hammes *et al.* (2018) e Silveira e Goldenfum (2007) (MARTINS VAZ *et al.*, 2020).

Desse modo, foi definida a utilização de metodologia computacional por meio de balanço hídrico, por se tratar da análise com maior especificidade dos fluxos hídricos dentro do pavimento. O dimensionamento foi realizado por meio do programa computacional *Permeable Design Pro* (ICPI, 2021), o qual tem parâmetros de drenagem e das camadas do pavimento como requisitos para o dimensionamento. Para o pavimento impermeável não foi estabelecido dimensionamento hidráulico, uma vez que a água é

conduzida diretamente para a boca de lobo e drenagem do estacionamento. Porém, fez-se necessário dimensionar desse modo as instalações de drenagem, conforme os manuais e as melhores práticas adotados no Brasil (PMSP, 2012; BEDUSCHI, 2020).

A Equação 5 (ICPI, 2021) mostra o modelo de balanço hídrico horário realizado pelo programa *Permeable Design Pro* para o pavimento permeável. A Tabela 7 mostra os parâmetros utilizados no programa para dimensionamento hidráulico da camada *reservoir course*. Os parâmetros foram definidos de acordo com o manual do programa (ICPI, 2021), manuais de dimensionamento de pavimentos permeáveis (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011; TSA, 2015) e trabalhos anteriores (MARTINS VAZ *et al.*, 2021b; ANTUNES *et al.*, 2020a).

$$V_T = V_{T-1} + \int_{T-1}^T (Q_{ent} - Q_{sai}) \cdot dt \quad (5)$$

Onde: V_T é o volume de água disponível no período T horário (m^3); V_{T-1} é o volume de água disponível no período "T-1" horário (m^3); Q_{ent} é o fluxo de água que entra no pavimento durante o intervalo horário de análise definido no programa (m^3 /intervalo); Q_{sai} é o fluxo de água que sai do pavimento durante o intervalo horário de análise definido no programa (m^3 /intervalo).

Tabela 7 – Parâmetros utilizados para o dimensionamento hidráulico.

Objeto	Parâmetro	Valor
Blocos e <i>bedding course</i>		2,0 ¹
Asfalto permeável		2,0 ¹
<i>Choker course</i>	Permeabilidade (mm/s)	11,0 ¹
<i>Reservoir course</i>		1014,0 ¹
Subleito		0,0 ¹ (impermeável)
	Tipo de distribuição pluviométrica	Tipo III - NRCS
	Área de drenagem	5000 m ²
	Área de contribuição adicional	0 m ²
Condições de drenagem	Distância entre drenos adjacentes	6 m
	Diâmetro do dreno	10, 15 e 20 cm
	Inclinação do dreno	≤ 1%
	Coefficiente de rugosidade do dreno	0,012*
	Volume inicial de água no sistema	0,0 m ³
	Máximo de água na <i>reservoir course</i>	100,0%

* Parâmetro adimensional / ¹ Valores baseados na literatura. Para os revestimentos foram escolhidos valores conservadores, superiores porém à norma ABNT (2015).

Para o dimensionamento da drenagem do sistema do pavimento impermeável fez-se também necessário utilizar as curvas IDF obtidas para cada cidade. Desse modo, foi obtida a vazão de drenagem por meio da intensidade pluviométrica, área e coeficiente de escoamento superficial, conforme o método racional. Foram utilizados como referência o tempo de recorrência de 10 anos e o tempo de duração de 5 minutos, conforme manuais de drenagem e boas práticas de dimensionamento. Com essa configuração foi possível dimensionar as bocas de lobo, caixas de inspeção e galerias pluviais. Para o pavimento permeável foram dimensionados os sistemas por meio da vazão de extravasão obtida após passagem pelo reservatório inferior de água pluvial. A Equação 6 mostra o método racional (PMSP, 2012).

$$Q = C \times i \times A \quad (6)$$

Onde: Q é a vazão de escoamento superficial no local de análise (l/h); C é o coeficiente de escoamento superficial (adimensional); i é a intensidade média de precipitação (mm/h); A é a área avaliada (m²).

Após o cálculo da vazão de água pluvial captada por cada boca de lobo, fez-se necessário dimensionar as galerias de água pluvial de modo a garantir vazão contínua. Conforme situação *in loco*, as galerias deságuam em um canal da universidade. Para avaliação hidráulica foi utilizada a equação de Manning, conforme mostra a Equação 7 (PMSP, 2012). Para cada caso e situação foi avaliada a inclinação, o coeficiente de Manning e a geometria da tubulação. Optou-se por simular tubulações com altura da lâmina de água com no máximo 85% do diâmetro interno. Para concreto, por exemplo, foi utilizado o coeficiente de Manning de 0,015 s/m^{1/3}.

$$Q = A \times V = A \times \frac{Rh^{2/3} \times \sqrt{S}}{\eta} \quad (7)$$

Onde: Q é a vazão das galerias pluviais analisadas (m³/s); V é a velocidade do escoamento na tubulação (m/s); A é a área da seção transversal de água na tubulação (m²); Rh é o raio hidráulico do escoamento (m); S é a inclinação de fundo do escoamento (%); η é o coeficiente de Manning (s/m^{1/3}).

Para qualificação da tubulação das galerias pluviais também foi necessário avaliar o tipo de tubulação a ser utilizada. O principal objetivo é confirmar a capacidade estrutural da tubulação de suportar as cargas de veículos, pavimento e solo subjacentes. Desse modo, fez-se utilização do programa computacional da Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto (ABTC), com os respectivos parâmetros de espessura de solo, tipo de veículos e pavimento condizentes com a situação de instalação (SEGNÍNI *et al.*, 2010). Como conclusão foi obtido o tipo de tubo a ser

utilizado, com ou sem necessidade de armação. Tem-se como possíveis classes de utilização a PS1 e PS2, sem o uso de armadura, e PA1, PA2, PA3 ou PA4, com uso de armadura.

Para o dimensionamento hidrológico-hidráulico do pavimento permeável, também foram utilizadas as curvas IDF de cada cidade. Porém, foram utilizadas como referência as alturas de lâmina d'água obtidas por meio da chuva com duração de 1440 minutos (24 horas), inseridas no programa *Permeable Design Pro* (ICPI, 2021) com a distribuição temporal tipo III da NRCS (ICPI, 2021). A escolha corresponde à precipitação com distribuição em menor tempo e conseqüente maior intensidade, fornecendo o caso mais crítico de análise. Fez-se a simulação desse modo para atender os requisitos da modelagem do *Permeable Design Pro*, com discretização da precipitação diária extrema conforme o modelo NRCS III.

3.3.7.2 Dimensionamento estrutural

O dimensionamento estrutural foi realizado por meio da metodologia AASHTO (1993) para pavimentos permeáveis, conforme apresentado por Martins Vaz *et al.* (2021b). O procedimento de dimensionamento estrutural leva em consideração variáveis como o número de Eixos Simples Padrão (ESP) do tráfego local, condições de drenagem, condições estruturais dos materiais utilizados no pavimento e do subleito e parâmetros estatísticos de confiabilidade. Para a simulação com tráfego de estacionamento, parâmetros estatísticos referentes a vias de baixo volume de tráfego são utilizados. Ao considerar o estudo de caso para estacionamentos de universidades, Martins Vaz *et al.* (2021b) obtiveram a necessidade de espessura da *reservoir course* de aproximadamente 20,0 centímetros para ISC de 5,00%.

Para este estudo foram calibrados três modelos de dimensionamento com três tipos de revestimentos: impermeável, asfalto permeável e concreto permeável. As Equações 8 e 9 (AASHTO, 1993) mostram a metodologia de dimensionamento estrutural. A Tabela 8 mostra os parâmetros da AASHTO (1993) utilizados para o dimensionamento.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r \times S_o + 9,36 \times \log_{10}(SN+1) - 0,2 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}(M_r) - 8,07 \quad (8)$$

$$SN = \sum_{i=1}^n a_{(i)} \times d_{(i)} \times m_{(i)} \quad (9)$$

Onde: W_{18} é o número de ESP durante a vida útil do pavimento (adimensional, 18 é referência para o peso padrão do eixo de 18,000 libras); Z_r é o número de desvios padrão necessário para obter, em distribuição normal, a probabilidade da falha

estrutural. Por exemplo, para 95% de confiabilidade e 5% de chance de falha, Z é $-1,645$ (adimensional); S_o é o desvio padrão do tráfego suportado durante a vida útil, levando em consideração a variabilidade da construção, os materiais assumidos e o número estimado de veículos futuros (adimensional); SN é o número estrutural do pavimento, que considera a espessura e os materiais das camadas (polegadas); ΔPSI é a diferença entre o Índice Presente de Serviço no início e no final do ciclo de vida do pavimento (adimensional); M_r é o módulo resiliente da camada de subleito (psi); $a_{(i)}$ é o coeficiente estrutural da camada i de pavimento (adimensional); $d_{(i)}$ é a espessura da camada i do pavimento (polegadas); $m_{(i)}$ é o coeficiente de drenagem da camada i do pavimento (adimensional); n é o número de camadas no pavimento.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados para o dimensionamento estrutural.

Objeto	Parâmetro	Imp.	PA	PC
Revestimento	Espessura (mm)	50	50	90
	Coeficiente estrutural (adimensional)	0,44	0,40	0,30
<i>Choker course</i> (permeável) ou Base (impermeável)	Espessura (mm)	100	100	100
	Coeficiente estrutural (adimensional)	0,14	0,11	0,11
<i>Reservoir course</i> (permeável) ou Sub-base (impermeável)	Coeficiente estrutural (adimensional)	0,11	0,08	0,08
	Coeficiente drenagem (adimensional)	1,2	1,0	1,0
Tráfego	ESP (eixo de 80kN)		100.000	
Subleito	ISC (%)		5,0	
	Zr		-0,385	
	So		0,48	
Variáveis do método	ΔPSI		2,2	

Valores de coeficiente estrutural obtidos conforme literatura.
 Valores de coeficiente de drenagem conforme AASHTO (1993).
 Demais valores conforme trabalhos similares (MARTINS VAZ *et al.*, 2021b).
 Imp. - Impermeável asfáltico / PA - Asfalto permeável / PC - Concreto permeável.

3.3.8 Tubulações, motobombas e dispositivos complementares

Para os três cenários alternativos (B, C e D) é necessário conectar os reservatórios por meio de tubulações. Conforme apresentado nas Figuras 23 a 25, são utilizados no sistema: drenos de PEAD para drenagem do pavimento, tubulações de PVC para recalque e distribuição da água pluvial, motobombas para recalque da água pluvial, filtro de descarte das primeiras águas, válvulas solenoides e sensores de nível. Desse modo, foi necessário estimar a quantidade de material a ser utilizada nos sistemas.

A estimativa de drenos de PEAD foi realizada de acordo com os resultados do dimensionamento hidráulico. Na Tabela 7 indica-se como distância entre drenos o

valor de seis metros, conforme valor máximo sugerido por manuais de pavimentação permeável (TSA, 2015). O formato dos drenos e distribuição no terreno faz-se em formato de espinha de peixe, de modo a otimizar a drenagem. Para cálculo e estimativa dos comprimentos será realizado o projeto básico de distribuição das tubulações no terreno, bem como distância em relação ao reservatório inferior.

As tubulações de PVC são necessárias para: conexão entre os reservatórios; extravasamento dos reservatórios e distribuição do reservatório superior de água pluvial aos mictórios, torneiras e vasos sanitários. Reitera-se que o projeto compreende a implantação de sistema novo para edificação a ser construída, de modo que não sejam contemplados elementos de reforma. Para estimativa das distâncias fez-se o croqui da edificação e calculou-se a distância média entre os pontos, bem como as alturas entre os pontos do projeto. Curvas, conexões, joelhos e demais singularidades foram tratadas como percentual adicional de PVC utilizado em obra, estimado em 33% do peso linear das tubulações, similar ao definido por Martins Vaz *et al.* (2020). Os diâmetros das tubulações de PVC foram dimensionados por meio da Equação de *ForschHeimmer-Bresse*, conforme realizado anteriormente por Martins Vaz *et al.* (2020) e Antunes *et al.* (2020a). A Equação 10 (MARTINS VAZ *et al.*, 2020) mostra o dimensionamento do diâmetro de recalque da tubulação de PVC.

$$D_r = 1,3 \times \sqrt{Q} \times \sqrt[4]{\frac{t}{24}} \quad (10)$$

Onde: D_r é o diâmetro da tubulação de recalque (mm); Q é a vazão de recalque provida por meio do catálogo técnico da motobomba escolhida (m^3/s); t é o tempo diário de funcionamento da motobomba, definido em quatro horas conforme manuais de instalações prediais (h).

As motobombas são responsáveis pelo recalque de água, pluvial ou potável, do reservatório inferior para o superior. Ou seja, deve-se dimensionar a potência utilizada de modo que seja capaz de atender a diferença de nível entre o reservatório inferior e superior e as perdas de carga ocasionadas por rugosidade e singularidades do sistema. A consideração da perda de carga foi contabilizada por meio da definição do comprimento e singularidades das tubulações do sistema, obtidos junto aos projetos arquitetônico e hidrossanitário dos blocos do CTC (DPAE, 2021). A Equação 11 mostra o cálculo da perda de carga unitária de *Fair-Whipple-Hsiao*, e a Equação 12 mostra o cálculo da altura manométrica total.

$$J = 8,69 \times 10^5 \times \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (11)$$

Onde: J é a perda de carga unitária (mca/m); Q é a vazão considerada para o sistema (l/s); D é o diâmetro interno do tubo (mm).

$$H = H_{rec} + H_{suc} = \Delta H + C_{rec} \times J_{rec} + C_{suc} \times J_{suc} \quad (12)$$

Onde: H é a altura manométrica do sistema (m); H_{rec} é a altura manométrica de recalque (m); H_{suc} é a altura manométrica de sucção (m); ΔH é a altura estática total (sucção e recalque); C_{suc} é o comprimento total de tubulação de sucção, considerados os comprimentos unitários das singularidades (m); C_{rec} é o comprimento total de tubulação de recalque, considerados os comprimentos unitários das singularidades (m); J_{suc} é a perda de carga unitária da tubulação de sucção (mca/m); J_{rec} é a perda de carga unitária da tubulação de recalque (mca/m).

A Equação 13 (ANTUNES *et al.*, 2020a) mostra a definição da potência necessária para a motobomba. Para a motobomba de água pluvial foram utilizadas máquinas com indicação para uso de água pluvial, com volume de turbidez e qualidade compatível com os materiais utilizados. Para a motobomba de água potável foram consideradas máquinas com esta finalidade de recalque de água potável. Por fim, cita-se que são necessárias duas unidades para cada tipo, potável e pluvial, de modo que uma possa obter manutenção enquanto a outra trabalha, sem ocorrer interrompimento do fluxo.

$$Pot = \frac{0,7355 \times Q_r \times H \times \gamma}{75 \times \eta} \quad (13)$$

Onde: Pot é a potência necessária das bombas (kW); γ é o peso específico da água (kgf/m³); H é a altura manométrica do sistema (m); η é o rendimento da bomba (adimensional); Q_r é a vazão de água pluvial a ser recalçada por meio da motobomba (m³/s).

É necessário também estabelecer o tempo de funcionamento das motobombas. Sabe-se que a situação de recalque é condicionada à disponibilidade de água pluvial ou potável, e da demanda diária estabelecida. Quando os sensores e situação permitirem, a motobomba é acionada e recalca água. Desse modo, o tempo de funcionamento corresponde ao volume consumido de água dividido pela vazão da motobomba, uma vez que toda água recalçada é consumida. Considerou-se que possíveis extravasamentos ocorrem somente no reservatório inferior, por eventual precipitação excedente. O número de horas de funcionamento pode ser calculado conforme a Equação 14.

$$Hf = V_u \times 365 \times \frac{D_i}{Q_i} \quad (14)$$

Onde: H_f é o número de horas de funcionamento de cada tipo de motobomba, potável ou não-potável (horas); V_U é o horizonte de análise do sistema (anos); D_i é a demanda diária média de água, potável ou não-potável (m^3); Q_i é a vazão da motobomba, potável ou não-potável ($m^3/hora$).

3.3.9 Manutenção

Em relação à operação, são consideradas manutenções e melhores práticas para todos os cenários. Para o Cenário A - Caso base, é necessário limpar o pavimento e o telhado com frequência anual, bem como verificar possíveis problemas nas instalações hidráulicas. Assume-se que certas manutenções serão similares para todos os cenários, porém são descritas nesta subseção de modo a apresentar as rotinas.

Para o cenário B, no qual ocorre captação por meio do telhado, é necessário limpar, inspecionar e reparar os elementos danificados com periodicidade constante também. Tem-se rotinas regulares, ocasionais e ações remediadoras, as quais contemplam diferentes fases na vida útil do sistema. Manutenções regulares referem-se às atividades que devem ser realizadas continuamente, de modo preventivo. Manutenções ocasionais são realizadas sempre que necessário, ou com frequência inferior às regulares. E por fim, ações remediadoras têm como finalidade reparar o sistema em caso excepcionais. O Quadro 4 mostra as manutenções recomendadas para captação de água pluvial por meio de telhados (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011).

Para o cenário C, no qual ocorre captação por meio do pavimento, também se cita a necessidade de limpar, inspecionar e reparar, porém com o adicional de verificar a permeabilidade e mitigar a colmatação do pavimento. Para pavimentos permeáveis tem-se a necessidade adicional de monitorar a performance do sistema com maior cautela, para garantir a permeabilidade. O Quadro 5 mostra as rotinas de manutenção sobre pavimentos permeáveis (WOODS-BALLARD *et al.*, 2011). Reitera-se que existe dificuldade em encontrar equipamentos para regeneração de permeabilidade no Brasil. No presente estudo foi considerada a reabilitação por meio de aspiração de rua a vácuo, como medida para inventário da ACV (*vacuum street sweeper*). Em casos extremos os blocos podem ser retirados e inspecionados, de modo a reabilitar a permeabilidade.

Quadro 4 – Manutenção recomendada para captação de água pluvial em telhados.

Rotina de manutenção	Ação requerida	Frequência típica
Manutenção regular	Inspeção dos reservatórios, por sedimentos ou acúmulo de detritos; tubulações, motobombas e filtros	Anual (ou após verificação de baixa performance)
	Limpeza dos reservatórios, calhas, tubulações, filtros e demais.	Anual (ou após verificação de baixa performance)
Manutenção ocasional	Limpeza e/ou troca dos filtros	Três meses e quando necessário
Ações remediadoras	Reparo de danos por erosão ou danos aos reservatórios	Quando necessário
	Reparo nas motobombas	Quando necessário

Fonte: Adaptado de Woods-Ballard *et al.* (2011).

Quadro 5 – Manutenção recomendada para pavimentos permeáveis.

Rotina	Ação requerida	Frequência típica
Manutenção regular	Varrição da superfície e sucção à vácuo	De 2 a 4 vezes ao ano (de preferência após o outono) ou conforme projetista ¹
Manutenção ocasional	Estabilizar e cortar áreas de contribuição e adjacentes	Conforme requisitado
	Remoção de vegetação	Conforme requisitado (uma vez por ano em pavimentos mais usados)
Ações remediadoras	Remediar superfícies que tenham desnivelado em 50 milímetros	Conforme requisitado
	Reabilitar blocos quebrados, repor juntas e verificar manifestações patológicas	Conforme requisitado
	Reabilitação da superfície e ajuste de permeabilidade de blocos colmatados	Cada 10 a 15 anos (ou conforme requisitado)
Monitoramento	Inspeção inicial	Mensalmente nos três primeiros meses após a instalação
	Inspeção para evidência de baixo desempenho ou de vegetação	Cada três meses ou após precipitação extrema
	Inspeção do acúmulo de detritos e verificar frequência de varrição	Anualmente
	Inspeção dos reservatórios	Anualmente

¹ Woods-Ballard *et al.* (2011) recomenda no mínimo anualmente, porém outros autores citam maior frequência (GARCIA *et al.*, 2020; HAMMES *et al.*, 2018; MARTINS VAZ *et al.*, 2021b).

Fonte: Adaptado de Woods-Ballard *et al.* (2011).

3.3.10 Qualidade da água pluvial

Para realizar as comparações entre os cenários de modo similar, deve-se atentar ao desempenho dos sistemas de captação de água pluvial e uso não-potável, com igualdade qualitativa. Ou seja, deve-se garantir desempenho mínimo de modo que os sistemas sejam similares, tanto na captação por telhado, como por pavimento, como no fornecimento hídrico convencional. Desse modo, atenta-se à norma brasileira de qualidade de água para usos não-potáveis NBR 16783 (ABNT, 2019b). Conforme

citado por Martins Vaz *et al.* (2021a), a NBR 16783 é mais restritiva que a NBR 15527, uma vez que não especifica coberturas como superfície de captação. A Tabela 9 mostra os requisitos para uso não-potável, de acordo com a NBR 16783.

Dentre os parâmetros avaliados por Hammes *et al.* (2018) e Ghisi *et al.* (2020), os valores de *Escherichia Coli* e turbidez estão fora dos aceitáveis de acordo com a NBR 16783, requisitando tratamento adicional. Em relação à captação de água pluvial por coberturas tem-se as mesmas problemáticas, com o atendimento usual do pH (RAINMAP, 2017), porém dificuldades em alguns tipos de telhados para atendimento do *Escherichia Coli* e turbidez. Desse modo, e similarmente a Antunes *et al.* (2020a), foi proposto tratamento adicional por meio de cloração, conforme preconiza a NBR 15527 (ABNT, 2019a), e dois reservatórios separados, inferior e superior, de modo a permitir parcial decantação das partículas sólidas e diminuição da turbidez. Não foram distinguidos os sistemas de tratamento para a água infiltrada no pavimento permeável ou no telhado, pois para os parâmetros citados na Tabela 9 e tratamentos propostos, não há diferenças na qualidade da água e nos procedimentos adotados.

Tabela 9 – Parâmetros qualitativos da NBR 16783.

Parâmetros	Valor limite
pH	6,0 a 9,0
Escherichia Coli	≤ 200 NMP/100ml
Turbidez	≤ 5 UT
DBO _{5,20}	≤ 20 mgO ₂ /L
CRL (Cloro Residual Livre)	Mínimo 0,5 mg/L - Máximo 5,0 mg/L Recomendável 0,5 mg/L - Máximo 2,0 mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) ou condutividade elétrica ^a	≤ 2000 mg/L ou ≤ 3200 μS/cm
Carbono Orgânico Total (COT) ^b	< 4 mg/L

^a Condutividade e SDT apresentam correlação.

^b Somente para água de rebaixamento de lençol freático.

Fonte: Adaptado da NBR 16783 (ABNT, 2019b).

3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Nesta seção são apresentadas as considerações realizadas para a ACV nos diferentes cenários. Conforme citado anteriormente, o estudo somente realizou a ACV para a cidade de Florianópolis e para as condições climáticas, pluviometria e curvas IDF, atuais. Busca-se compreender as condições atuais de possíveis impactos ambientais, bem como as possíveis melhorias com a captação descentralizada de água

pluvial. Nas seções anteriores focou-se na definição e dimensionamento dos sistemas, de modo a compreender os elementos pertinentes aos cenários. Desse modo, pode-se compôr o inventário de fluxos, energias e materiais utilizados para cálculo da ACV.

3.4.1 Considerações iniciais

Para o trabalho foram utilizados como referência estudos similares de ACV sobre sistemas de captação de água pluvial e/ou pavimentos permeáveis (ANTUNES *et al.*, 2020a, 2020b; MARINOSKI; GHISI, 2019; FATHOLLAHI; COUPE, 2021; GHIMIRE *et al.*, 2017). Também foram levadas em consideração as etapas e requisitos das normas brasileiras de ACV (ABNT, 2009a, 2009b), de modo que sejam definidos objetivo e escopo, realizado o inventário de fluxos, avaliação dos potenciais impactos do ciclo de vida dos sistemas e interpretação de modo a fornecer conclusões acerca dos resultados obtidos. Demais características pertinentes às fases citadas são definidas nas próximas seções. Cita-se que o programa utilizado para a realização da ACV é o *OpenLCA* (GREENDELTA, 2021), de modo a priorizar o uso de sistemas de uso livre e gratuito, ampliando a possibilidade de conferência e reprodução do estudo.

3.4.2 Objetivo e escopo da ACV

O objetivo da ACV contempla a avaliação de diferentes sistemas de captação de água pluvial e drenagem de estacionamento para edifícios públicos universitários, com realização de um estudo de caso. O método se baseia nas pesquisas de Marinoski e Ghisi (2019) e Antunes *et al.* (2020a). Pretende-se explorar diferentes configurações de modo a ampliar o conhecimento sobre os potenciais impactos ambientais, bem como disseminar o uso da técnica de pavimentos permeáveis e captação de água pluvial. Ambas as técnicas são vistas como potenciais ferramentas para mitigação dos efeitos de mudanças climáticas em centros urbanos.

3.4.2.1 Função de comparação e unidade funcional

De modo similar ao avaliado por Antunes *et al.* (2020a), o sistema de pavimentos permeáveis e captação de água pluvial em telhados possui três funções: fornecimento hídrico para os usuários da edificação (1), drenagem da precipitação incidente (2) e pavimentação para uso de veículos leves (3). A terceira função incorpora as características de uso de pavimentos, como albedo e efeitos de Ilha de Calor Urbano (ICU). Desse modo, tem-se a seguinte configuração de funções:

- Cenário A - Caso base: Fornecimento hídrico somente por meio da concessionária e drenagem diretamente para galeria de água pluvial do município. Pavimento impermeável para uso de veículos leves;

- Cenário B - Captação telhado: Fornecimento hídrico parcial por meio da concessionária local. Fornecimento hídrico parcial por meio do sistema de captação de água pluvial pelo telhado. Drenagem do pavimento para galeria de água pluvial. Pavimento impermeável para uso de veículos leves;
- Cenário C - Captação pavimento: Fornecimento hídrico parcial por meio da concessionária local. Fornecimento hídrico parcial por meio do sistema captação de água pluvial pelo pavimento. Drenagem do telhado para galeria de água pluvial. Pavimento permeável para uso de veículos leves;
- Cenário D - Captação total: Fornecimento hídrico parcial por meio da concessionária local. Fornecimento hídrico parcial por meio do sistema captação de água pluvial pelo pavimento e telhado. Drenagem somente da extravasão do sistema de captação de água pluvial. Pavimento permeável para uso de veículos leves.

A unidade funcional serve como unidade de referência para quantificação dos diferentes sistemas avaliados em uma ACV. Ou seja, recomenda-se que se use a unidade funcional como valor de referência, de modo que sejam normalizados os diversos fluxos de acordo com desempenho similar pretendido. Antunes *et al.* (2020a) utilizaram como referência a drenagem de toda a água incidente no pavimento permeável, ou extravasada pelo sistema de captação, e o fornecimento hídrico de toda a demanda, potável e não-potável, durante o horizonte de tempo do sistema. Para o estudo somente insere-se a drenagem ou uso da água captada pelo telhado da edificação. Ou seja, tem-se como unidade funcional a drenagem da precipitação incidente no local e fornecimento hídrico aos usuários da edificação durante o horizonte de análise.

3.4.2.2 Horizonte de tempo

O horizonte de tempo serve como referência para o inventário da ACV, de modo que sejam inseridos os fluxos e processos existentes durante o período de análise. De acordo com Antunes *et al.* (2020a), diversos autores utilizam horizontes de análise de 20 anos, por corresponder à vida útil das instalações hidráulicas. Desse modo, qualquer componente analisado que possua vida útil inferior será repostado de modo a chegar ao horizonte de tempo com desempenho desejado. Para os diferentes tipos de sistemas analisados, incluindo os diferentes revestimentos para o pavimento permeável, baseou-se a vida útil na literatura e em catálogos técnicos.

3.4.2.3 Fronteiras de análise

O estudo foi realizado do "berço ao túmulo", de modo a abordar os potenciais impactos ambientais relacionados a todas as fases do ciclo de vida do sistema. O termo "berço ao túmulo" significa abordar processos desde a extração dos materiais

necessários até a disposição final, envolvendo as demais etapas intermediárias. Ou seja, são incluídos nas fronteiras de análise as etapas de: extração de recursos e matérias primas, processamento e manufatura, distribuição e transporte, uso e operação e por fim disposição final. Durante a fase de uso e operação também se citam as etapas de reposição dos materiais e destinação final das peças substituídas e manutenção do sistema.

Conforme avaliado por Liu *et al.* (2020), outros impactos ambientais durante o uso do ciclo de vida do sistema podem ser avaliados, como resistência à rolagem e maior consumo de combustível, impacto na ilha de calor urbano gerada por meio da alteração no albedo e desvios de rotas ou não utilização da pista devido aos alagamentos. Nesta pesquisa serão incorporados somente os impactos positivos dos benefícios de melhoria da qualidade da água, carbonatação, mudança de albedo e reúso da água pluvial infiltrada, seguindo as equações compiladas por Antunes *et al.* (2022).

Ressalta-se, por fim, que o "Cenário C - Captação pavimento" e o "Cenário D - Captação total" possuem duas variações com revestimento em concreto permeável e em asfalto permeável. Desse modo, tem-se o Cenário C com concreto permeável e com asfalto permeável, e o Cenário D com concreto permeável e com asfalto permeável. Maiores detalhes dos pavimentos e das considerações dos revestimentos são apresentados na subseção 3.3.7. As Figuras 29 a 32 mostram as fronteiras de análise consideradas na pesquisa.

Figura 29 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário A - Caso base.

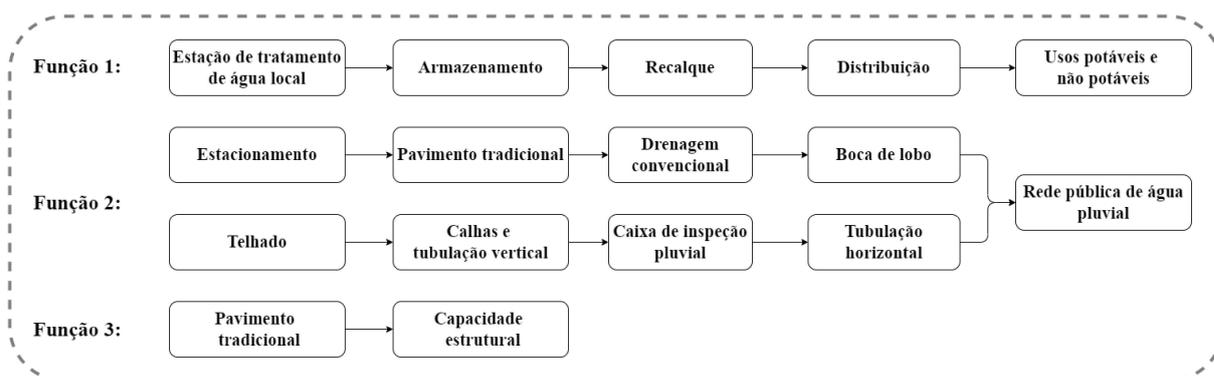


Figura 30 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário B - Captação telhado.

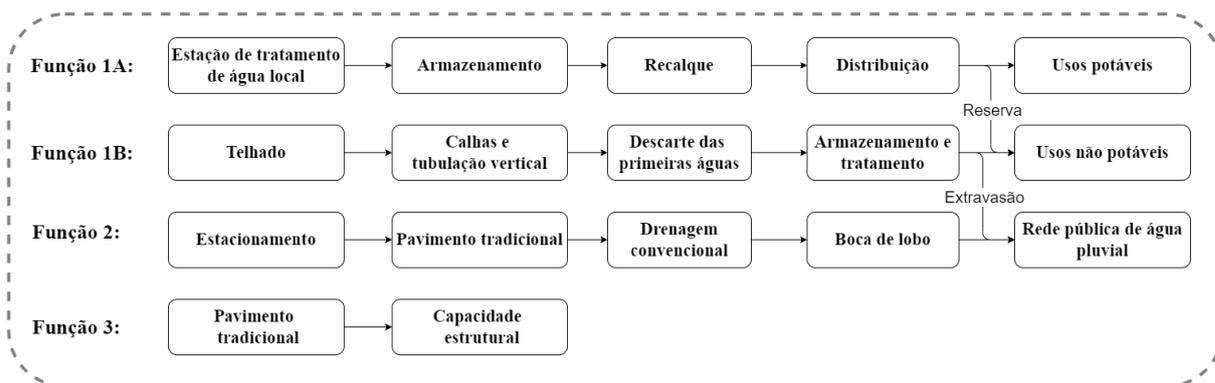


Figura 31 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário C - Captação pavimento.

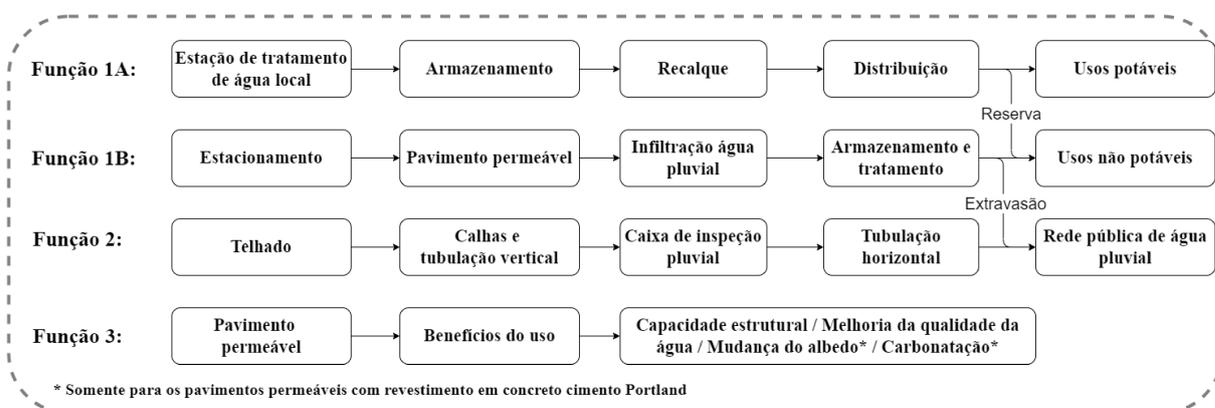
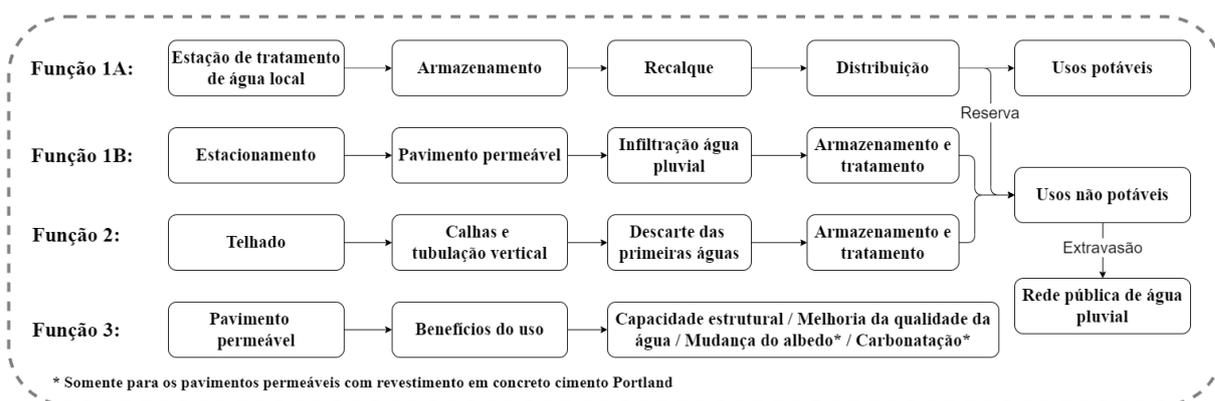


Figura 32 – Delimitação das fronteiras de análise do cenário D - Captação total.



3.4.2.4 Omissões e exclusões da ACV

Faz-se necessário também estabelecer as omissões e exclusões adotadas neste trabalho. As omissões estão relacionadas com elementos do sistema presentes em todos os cenários avaliados, de modo que a comparação não se altere. Ou seja, os processos elementares similares aos cenários foram excluídos.

Em relação à exclusão, tem-se os elementos que não geram potenciais impactos

relevantes ao sistema comparativo, não alterando o resultado da comparação e a tomada de decisão. Tem-se a necessidade de excluir elementos devido à complexidade da ACV, de modo que simplificações de processos elementares não significativos melhora a visibilidade e execução da pesquisa. Antunes *et al.* (2020a) e Marinowski e Ghisi (2019) utilizaram como critério de exclusão o valor de 1% em massa. Para esta pesquisa será utilizado o critério de exclusão de Sánchez *et al.* (2020), com exclusão de processos que contribuem menos de 1% em massa, energia e dióxido de carbono emitido.

3.4.3 Inventário

3.4.3.1 Considerações iniciais

A fase de inventário refere-se à quantificação das entradas, saídas e processos intermediários, descrição das fontes de dados e da qualidade da informação obtida, validação dos dados e demais definições referentes aos processos elencados. Desse modo, deve-se primeiramente obter todos os fluxos de entrada e saída do sistema, de acordo com os critérios definidos no objetivo e escopo. Tem-se fluxos energéticos e de materiais como objetivo da caracterização, sendo utilizadas pesquisas similares como referência, bem como a caracterização do objeto de estudo. Utiliza-se como base a norma NBR 14044 (ABNT, 2009b) e as definições para a fase de inventário. Para o trabalho foram separadas as etapas de análise em cinco grupos, conforme mostrado no Quadro 6.

Quadro 6 – Grupos considerados para o inventário da ACV.

Efeitos considerados	Dados avaliados
Efeitos iniciais	Materiais usados para construção do sistema. Deve-se incluir efeitos de fabricação, transporte e processos dentro da etapa de manufatura.
Efeito de operação	Energia utilizada para bombeamento da água pluvial, energia gasta nos sensores e válvulas e efeitos de operação.
Efeito de uso	Impactos evitados durante a fase de uso por diminuição da poluição entregue à drenagem, alteração do albedo do pavimento e carbonatação do concreto.
Efeito de manutenção	Materiais repostos durante a vida útil, incluindo fabricação, transporte e processos. Efeitos da manutenção e gastos de energia.
Efeito de final de vida	Materiais destinados para disposição final, incluindo transporte.

Fonte: Adaptado de Marinowski e Ghisi (2019)

Com os grupos de efeitos estabelecidos, parte-se para o inventário de processos finais e intermediários considerados. Os principais processos foram baseados em pesquisas similares (MARINOSKI; GHISI, 2019; ANTUNES *et al.*, 2020a; BHATT *et*

et al., 2019; LIU *et al.*, 2020), bem como em trabalhos sobre a definição de sistemas de pavimentos permeáveis (PINTO, 2011; ACIOLI, 2005; VIRGILIIS, 2009; WOODS-BALLARD *et al.*, 2011) e sistemas de captação de água pluvial (TESTON *et al.*, 2018; MARTINS VAZ *et al.*, 2021b; FREITAS; GHISI, 2020). Os sistemas foram então des-trinchados nos processos elementares, definidos como menores unidades avaliadas na ACV, com quantificação das respectivas entradas e saídas. Para cada processo foi avaliada a existência de correspondente na base de dados *Ecoinvent* 3.8 (WERNET *et al.*, 2016), ou em base de dados similar gratuita. Para processos não encontrados na base de dados *Ecoinvent*, foram utilizados dados da literatura específica do tema. Com os processos estabelecidos fez-se a modelagem por meio do programa computacional *OpenLCA* (GREENDELTA, 2021). Dentro do programa foram ainda subdivididos os cenários, de modo a permitir a comparação.

3.4.3.2 Transporte

Para dados de transporte foram utilizados processos específicos do *Ecoinvent*, com base em dados brasileiros. A partir da base *Ecoinvent* 3.8, foram inseridos processos de transporte baseados na realidade brasileira, obtidos a partir da parceria com a Rede ACV. Desse modo, foi possível obter consumos de combustível, impactos, desgaste de rodovia, e demais parâmetros referentes à realidade de transporte no Brasil. Os processos também foram separados em quantidade de carga, definindo-se o tamanho do caminhão de transporte. Para a maior parte dos componentes foi utilizado o transporte em caminhão com capacidade de carga entre 7,5 a 16 toneladas, com casos raros de transportes menores ou maiores quando julgado condizente com a realidade proposta. Foram colocados os três processos utilizados para transporte no Apêndice D, sendo definido para cada material o tamanho correspondente de caminhão necessário.

3.4.3.3 Manutenção

Em relação à manutenção, foram inseridos dois processos na ACV. O primeiro condiz à quantidade de reposições durante a vida útil do sistema, baseada na vida útil dos diferentes materiais e produtos utilizados. O modelo de cálculo segue as premissas da literatura (ANTUNES *et al.*, 2020a; MARTINS VAZ *et al.*, 2020; MARINOSKI; GHISI, 2019). O segundo contempla o combustível necessário para aspiração do pavimento, dado um equipamento de porte e capacidade suficientes. Como referência para a quantificação do combustível foram considerados: um modelo de caminhão aspirador a vácuo, com seu consumo de diesel diário; a quantidade de aspirações anuais necessárias, baseada na literatura; e a área a ser aspirada do pavimento.

3.4.3.4 Consumo energético das motobombas

Em relação ao consumo energético das motobombas e o consumo energético do volume hídrico fornecido pela concessionária, foram utilizadas a Equação 13 e o valor indicado pelo SNIS (2020). Ambos foram modelados com processos específicos do Brasil, conforme disponibilizado na base de dados *Ecoinvent*. A base de dados conta ainda com regionalização brasileira, com especificidade para a região sul. Incluem-se emissões relativas à matriz energética local, a qual é majoritariamente hidrelétrica. Utilizou-se para cálculo da energia das motobombas a equação proposta por Antunes *et al.* (2020a), a qual incorpora fatores de eficiência e de gastos energéticos em modo *stand by*. A Equação 15 (ANTUNES *et al.*, 2020a) apresenta a energia necessária para recalque da água pluvial.

$$E_{moto} = \frac{P_{ot} \times t_{bomb}}{\eta} + n_p \times e_{arranque} \quad (15)$$

Onde: E_{moto} é o consumo diário de energia das motobombas do sistema (kWh/dia); P_{ot} é a potência da motobomba escolhida para o sistema (kW); t_{bomb} é o tempo que a bomba fica ligada em um dia (h/dia); η é o rendimento/eficiência da bomba (adimensional); n_p é o número de partidas diárias que a motobomba realiza (arranques/dia); $e_{arranque}$ é o consumo de energia elétrica necessário para iniciar o funcionamento da motobomba (kWh/arranque).

3.4.3.5 Fase de uso e benefícios ambientais

Os impactos ambientais da fase de uso foram propostos baseados nos artigos compilados por Antunes *et al.* (2022). Como conclusão principal, Antunes *et al.* (2022) apresentaram uma estrutura de possíveis aspectos a serem avaliados na fase de uso de pavimentos permeáveis, conforme demonstração adaptada na Figura 33.

Conforme o estudo de caso foi realizado em um estacionamento, os aspectos específicos referentes ao desvio de tráfego, mudança de iluminação e combustível adicional por rugosidade do pavimento foram considerados não influentes, uma vez que uma pequena área de pavimento (em escala urbana) está sendo modificada. Também se considerou que a recarga de lençol freático não é existente, uma vez que o sistema conta com membrana impermeável subposta. Por fim, o item de influência térmica em edifícios adjacentes foge do escopo dessa pesquisa, e fica de sugestão a trabalhos futuros. Os demais itens foram considerados: (1) Melhorias na qualidade da água, (4) Mitigação de ilhas de calor urbano, (5) Carbonatação e sequestro de carbono e (9) Reúso de água pluvial em edifícios adjacentes.

Figura 33 – Estrutura de possíveis aspectos avaliados durante a fase de uso de sistemas de pavimentos permeáveis.



O último item, (9) reúso de água pluvial em edifícios adjacentes, consta no inventário por meio da água economizada, calculada conforme explicado na seção 3.3.6. Ou seja, foi calculada a quantidade de água demandada nos 20 anos de análise (cenário base) e diminuída a água economizada pelo sistema de aproveitamento (demais cenários). Os demais itens foram inseridos conforme as metodologias propostas pelos autores revisados por Antunes *et al.* (2020a).

Liu *et al.* (2020) realizaram o que se acredita ser a ACV com inclusão do maior número de benefícios ambientais, incluindo os impactos ambientais da melhoria da qualidade da água, dos desvios devido à inundação e manutenções, da mudança do albedo da superfície, da resistência à rolagem das diferentes superfícies e da recarga do lençol freático. Desse modo, incluem-se no inventário os itens (1) "Melhorias na qualidade da água" e (4) "Mitigação de ilhas de calor urbano" por meio das Equações 16 e 17 (LIU *et al.*, 2020), respectivamente.

Para a Equação 16 (LIU *et al.*, 2020), também é necessário definir a taxa de remoção e a concentração inicial dos poluentes. Foram escolhidos os poluentes: zinco, fósforo total e nitrogênio total. A definição levou em consideração a literatura disponível no tema. Conforme Liu *et al.* (2020), as taxas de remoção podem ser correlacionadas com a espessura da camada granular, considerada a espessura das camadas de *reservoir course* e *choker course*. Desse modo, foi calculada a taxa para cada poluente, dado o resultado do perfil do pavimento. A concentração inicial, por sua vez, foi determinada conforme estudos da literatura (GHISI *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020; HAMMES

et al., 2018; THIVES *et al.*, 2018). Para o fósforo total foi definido o valor de 2,5 mg/l; para nitrogênio total, 1,5 mg/l e para zinco, 0,5 mg/l. Os valores variam amplamente na literatura, e foram definidos como uma estimativa média de valor a ser encontrado.

$$\Delta M_i = \gamma_i \times \beta_i \times P \times A \times n \quad (16)$$

Onde: ΔM_i é a variação de massa do poluente (kg); γ_i é a concentração inicial do poluente (kg/L); β_i é a taxa de remoção do poluente (%); P é a precipitação anual (mm); A é a área do pavimento (m²) e n é o período de análise do tratamento (anos).

Para a Equação 17 (LIU *et al.*, 2020), foi necessário avaliar a estimativa da mudança na força radiativa devido à mudança do albedo. Para tal foram utilizados os valores sugeridos por Liu *et al.* (2020) e comparados com demais trabalhos existentes (YU; LU, Q., 2014; SANJUÁN *et al.*, 2021). As taxas padrões obtidas foram então verificadas de modo a ser utilizado um valor de referência médio, de modo que não fossem extrapolados nem ignorados os benefícios do aumento do albedo da estrutura. Optou-se por utilizar o valor de 1,54 W/m², conforme Liu *et al.* (2020), o qual gera uma compensação de 2,46 kg de CO₂ por m² de pavimento e por mudança de 0,01 no albedo. Tal estimativa é próxima de Akbari *et al.* (2009) e Sanjuán *et al.* (2021), os quais obtiveram 2,50 e 2,55 kg/m²/albedo, respectivamente.

$$0,01\alpha = \frac{1,087 \times RF \times t}{0,217 \times t - 44,78e^{-t/172,9} - 6,26e^{-t/18,51} - 0,22e^{-t/1,186} + 51,26} \quad (17)$$

Onde: RF é a estimativa de mudança na força radiativa devido à mudança de albedo de uma superfície (W/m²), estimada em 1,54 W/m² conforme valor médio adotado por Liu *et al.* (2020); α é o valor do albedo da superfície (adimensional) e t é o período de análise do sistema (anos).

Sabe-se que o uso de estimativas médias, conforme citado, gera incerteza ao modelo. Porém, dado o estado da arte no tema, serve de primeira abordagem para a inclusão destes impactos em um inventário de ACV. Em futuros trabalhos pode-se modelar fisicamente os pavimentos propostos de modo a avaliar demais fatores influentes na compensação de CO₂ gerada pelo aumento do albedo ou do Índice de Refletância Solar (SRI). Aspectos como rugosidade da superfície podem ser abordados e incluídos nos diferentes modelos de revestimentos, como também o efeito de absorção de calor latente da água em evaporação, presente nos pavimentos permeáveis. Acredita-se que a adição destes benefícios no inventário da ACV modificariam os resultados a favor do menor impacto ambiental dos sistemas alternativos.

O item (5), por sua vez, foi definido conforme o estudo de Ellingboe *et al.* (2019). Em seu estudo, os autores avaliaram diferentes composições de concreto de modo a definir a quantidade de CO_2 que é sequestrada teoricamente por meio do processo químico de carbonatação. A quantidade depende do grau de hidratação dos materiais cimentícios, da composição cimentícia do concreto final (em massa) e do peso molecular dos compostos presentes. Ou seja, a carbonatação pode variar entre os tipos de cimento, CP-I ou CP-III por exemplo, bem como na execução da estrutura, com mais ou menos porosidade da mistura. A Equação 18 (ELLINGBOE *et al.*, 2019) mostra o modelo de cálculo da massa teórica de CO_2 sequestrado. Para o presente estudo foi adotado o valor de 10% das emissões iniciais do concreto permeável.

$$C_m = \Phi_h MW_{CH} \times \left(\frac{3}{2} \frac{B_{C_3S}}{MW_{C_3S}} + \frac{1}{2} \frac{B_{C_2S}}{MW_{C_2S}} - \frac{2}{1} \frac{B_{C_4AF}}{MW_{C_4AF}} \right) \left(\frac{MW_{CO_2}}{MW_{CH}} \right) \quad (18)$$

Onde: C_m é o potencial teórico de sequestro de CO_2 (kg CO_2 / kg cimento); Φ_h é o grau de hidratação dos componentes cimentícios (%); B é a composição de Bogue (%) e MW é o peso molecular, ambos dos compostos cimentícios.

3.4.3.6 Destinação final dos componentes

A destinação final dos componentes é um importante fator de análise, conforme confirmado por Antunes *et al.* (2020a) e Marinoski e Ghisi (2019), com impacto significativo em sistemas de captação de água descentralizados. Desse modo, avaliaram-se as possibilidades e definiram-se métodos de comparação transparentes. Para Florianópolis, existem projetos para tornar a cidade "lixo zero" até 2030 (DORNELLES, 2021), o que corrobora com a análise de potencial de reúso e reciclabilidade dos sistemas. Porém, buscou-se também compreender análises pessimistas e realistas de tal configuração, uma vez que atualmente a cidade transfere 90% de seu lixo para o aterro sanitário de Biguaçu, totalmente incongruente com a realidade almejada (DORNELLES, 2021).

Por mais que se espere o reúso e a reciclagem, definiu-se a destinação final no projeto como aterro sanitário, dentro dos processos do Wernet *et al.* (2016). Entende-se que a realidade atual é a de descarte, enquanto configurações futuras de reciclagem e reúso são de difícil definição. O processo considerado no OpenLCA contempla o tratamento do material descartado, definido em diferentes processos de acordo com o tipo de componente, somado ao momento de transporte do material. Para o tratamento de polietileno, por exemplo, foi considerada a adição de energia, eletricidade, parcela do aterro sanitário e outros elementos necessários para a disposição final. Cabe ressaltar que para materiais sem processos existentes na literatura, como o latão para os registros do sistema hidráulico, foi considerado o tratamento de material inerte.

Todavia, em vistas às metas de reciclabilidade e futura lotação do aterro de Biguaçu, ao fim da vida útil, decidiu-se definir a distância final como o centro de triagem de resíduos de Florianópolis. Desse modo, o transporte da destinação final ficou definido até a Companhia Melhoramentos da Capital (COMCAP), de onde pode ser futuramente destinado ao aterro, reúso ou reciclagem, dependendo do nível de deterioração dos materiais e da tecnologia existente. Claramente, se for definida a destinação somente ao aterro sanitário, conforme realizado por Antunes *et al.* (2020a), a distância de transporte final pode ser maior, com consequentes maiores impactos. Tal análise é similar à mudança do processo de tratamento final, conforme discutido anteriormente.

3.4.4 Método de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Com a realização do inventário e quantificação dos processos correspondentes aos diferentes cenários avaliados, parte-se para a etapa de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV). A AICV, de acordo com a NBR 14044 (ABNT, 2009b), possui como etapas a definição das categorias de impacto da ACV, classificação e caracterização, bem como elementos opcionais a serem definidos conforme execução do estudo, conforme mostrado no Quadro 3. Desse modo, foram realizados todos os processos obrigatórios e iterativamente será avaliada a necessidade de realização dos opcionais durante a execução do projeto.

Foi definido como método de AICV o *ReCiPe* 2016 (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). Em 2016, Huijbregts *et al.* (2017) atualizaram o método de AICV *ReCiPe* 2008, de modo a atualizar os fatores e introduzir trajetórias possíveis de impactos ambientais. Outro ponto interessante foi a adoção de fatores de caracterização para países, além das possibilidade de médias globais, de modo a especificar o local avaliado. A escolha do método de AICV baseou-se nas Tabelas 3 e 4, visto ser o mais utilizado para sistemas similares ao do estudo. Também fez-se a escolha do *ReCiPe* por possuir categorias de danos *midpoint* e *endpoint*, de modo a auxiliar na fase de interpretação dos resultados. Os fatores de conversão de *midpoint* para *endpoint* foram atualizados da versão *ReCiPe* 2008 para a *ReCiPe* 2016.

De acordo com Goedkoop *et al.* (2009), o termo *midpoint* denota o potencial impacto ambiental dentro da trajetória causa-impacto, correspondente aos impactos similares dos diferentes processos de análise. Ou seja, para esta categoria identifica-se maior relação com o fluxo avaliado e menor incerteza, uma vez que o inventário é diretamente associado aos impactos específicos. O termo *endpoint* corresponde aos danos causados por meio da agregação de categorias *midpoint*, com o método *ReCiPe* 2016 agregado em três grupos: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos. A facilidade de interpretação dos resultados é obtida pelo método *endpoint*, uma vez que agrega-se maior incerteza em relação às relações com os fluxos. O Quadro 7 mostra as dezoito categorias de impacto intermediárias

(*midpoint*) e três categorias finais (*endpoint*) do método *ReCiPe* 2016.

Quadro 7 – Categorias *midpoint* e área de proteção *endpoint* do método de AICV.

Categorias de impacto <i>midpoint</i>	Unidade	Área de proteção <i>endpoint</i>
Aquecimento global	<i>kg CO₂ eq</i>	Saúde humana / Dano ao ecossistema
Depleção de ozônio estratosférico	<i>kg CFC 11 eq</i>	Saúde humana
Radiação ionizante	<i>kBq Co 60 eq</i>	Saúde humana
Formação de partículas finas	<i>kg PM_{2,5} eq</i>	Saúde humana
Formação de ozônio troposférico (ecossistema)	<i>kg NO_x eq</i>	Dano ao ecossistema
Formação de ozônio troposférico (humanos)	<i>kg NO_x eq</i>	Saúde humana
Acidificação terrestre	<i>kg SO₂ eq</i>	Dano ao ecossistema
Eutrofização de água potável	<i>kg P eq</i>	Dano ao ecossistema
Eutrofização de água marinha	<i>kg N eq</i>	Dano ao ecossistema
Toxicidade humana (cancerígena)	<i>kg 1, 4 DCB</i>	Saúde humana
Toxicidade humana (não-cancerígena)	<i>kg 1, 4 DCB</i>	Saúde humana
Ecotoxicidade terrestre	<i>kg 1, 4 DCB</i>	Dano ao ecossistema
Ecotoxicidade de água potável	<i>kg 1, 4 DCB</i>	Dano ao ecossistema
Ecotoxicidade de água marinha	<i>kg 1, 4 DCB</i>	Dano ao ecossistema
Uso e transformação do solo	<i>m² a crop eq</i>	Dano ao ecossistema
Uso de água	<i>m³</i>	Saúde humana / Dano ao ecossistema
Depleção de recursos minerais	<i>kg Cu eq</i>	Escassez de recursos
Depleção de recursos fósseis	<i>kg oil eq</i>	Escassez de recursos

Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017)

Também é importante ressaltar que existem três tipos de análise temporal e de incertezas do método *ReCiPe*: Individualista (I), Hierarquista (H) e Igualitária (E). A escolha condiz com a análise temporal dos potenciais impactos ambientais, respectiva ao horizonte de análise e à perspectiva do estudo. Ou seja, a escolha não ressalta os padrões humanos de impacto ambiental, porém agrupa tipos de escolhas e escopos de análise. De acordo com Goedkoop *et al.* (2009), a perspectiva individualista condiz com análise de curto período de tempo, com impactos específicos e otimismo tecnológico. A perspectiva hierarquista prevê práticas comuns em relação ao tempo de análise e aos problemas ambientais considerados. Por fim, a perspectiva igualitária é a mais pessimista, com o maior tempo de análise e maior abrangência de impactos ambientais, que podem até não estar completamente estabelecidos.

Desse modo, foi definido o uso da perspectiva individualista para condizer com o curto período de análise estabelecido anteriormente e com a meta específica da gestão universitária. Tal escolha corresponde ao perfil otimista de impactos ambientais entre as diferentes categorias, de modo que o impacto global seja menor que as outras possibilidades temporais. Porém, analisando no escopo comparativo, torna-se o caso mais pessimista, uma vez que são obtidos menores impactos em longa data, os

quais poderiam beneficiar ainda mais a escolha de meios alternativos de suprimento hídrico. Ou seja, escolhe-se o perfil individualista de modo a comparar a realidade em curto prazo dos impactos ambientais do sistema, mesmo que impactos futuros sejam mitigados. Resultados prévios realizados com os três tipos de AICV corroboraram as escolhas do perfil temporal de análise.

3.4.5 Interpretação

Por fim, a etapa de interpretação serve para a união das três anteriores de modo a validar as perspectivas com os resultados e garantir que os procedimentos estejam alinhados. Desse modo, foram avaliados os resultados de modo a encontrar inconsistências ou dados inválidos. Foram avaliadas as categorias de maior potencial impacto e os componentes e fases responsáveis, de modo a compreender como modificações podem ser indicadas para melhoria do sistema. Também busca-se discutir sobre os potenciais impactos ambientais do sistema atual de fornecimento hídrico e drenagem, de modo a compreender potenciais melhorias do sistema, além dos cenários propostos.

3.4.6 Agrupamento dos resultados

Outro tópico de importante comentário é a escolha dos coeficientes de ponderação e normalização das categorias *endpoint* para agrupamento em uma pontuação final. De modo similar a Antunes *et al.* (2020a), esta pesquisa utilizou de pontuação única para comparação dos resultados, e para tal, em cada unidade *endpoint* final foram agregados coeficientes de ponderação e normalização de acordo com a relevância dada aos impactos. Ou seja, equipararam-se as diferentes unidades (DALY, espécies.ano e USD2013) em pontos de mesma escala, os quais foram agregados para estimar o impacto final de cada cenário. As incertezas acerca desta escolha foram discutidas na etapa de interpretação.

Para o presente estudo foram utilizados os coeficientes de agrupamento indicados dentro do programa OpenLCA, indicados como fatores globais de 2010. Acredita-se que o uso destes coeficientes forneça uma análise preliminar equiparada, que pode ser utilizada como referência para visualizar as diferenças dos impactos entre cenários. Porém, sabe-se também que a modificação dos coeficientes altera os resultados finais, e portanto, tomar-se-á cautela na exposição dos resultados. Tem-se como coeficientes de normalização e ponderação os seguintes valores:

- DALY - Normalização com fator de 89,9 e ponderação com 400;
- Espécies.ano - Normalização com fator de 1492 e ponderação com 400;
- USD2013 - Normalização com fator de $3,22 \times 10^{-5}$ e ponderação com 200.

Conforme requisito da ABNT (2009b), são necessárias duas declarações ao serem realizadas análises com agrupamento. São elas:

"A ABNT NBR ISO 14044 não estabelece nenhuma metodologia específica e nem apoia as escolhas de valores subjacentes utilizadas para agrupar as categorias de impacto. / As escolhas de valores e julgamentos contidos nos procedimentos de agrupamento são de responsabilidade exclusiva do solicitante do estudo (por exemplo, governo, comunidade, organização etc.)"(ABNT, 2009b, p. 31).

Todavia, por mais que não seja estabelecida uma metodologia específica pela ABNT (2009b), foi realizado o agrupamento por meio da multiplicação dos coeficientes de normalização e ponderação pelos impactos finais *endpoint*. Desse modo, pode-se visualizar quais processos apresentaram maior escala na pontuação final e conseqüente maior relevância ambiental, dados os parâmetros utilizados. As discussões dos resultados também foram realizadas em categoria *midpoint* e *endpoint* sem o agrupamento.

3.4.7 Avaliação da qualidade dos dados

Uma das ferramentas disponibilizada pelo programa computacional OpenLCA é a avaliação de qualidade dos dados inseridos. O programa, por meio de uma matriz de classificação dos processos, indica a classificação de qualidade dos dados. Dentre as possíveis matrizes utilizáveis, optou-se por considerar como referência a matriz de qualidade dos dados fornecida pelo Ecoinvent, conforme mostra a Figura 34. As propriedades de qualidade consideradas nesta pesquisa são a confiabilidade, completude, correlação temporal, geográfica e tecnológica.

Ou seja, após utilizar diversos processos para composição de uma análise, o programa aplica a média ponderada em relação a cada impacto *midpoint*, de modo a fornecer um indicador sobre a qualidade dos dados utilizados. A pontuação dos processos é realizada em categorias de um a cinco para cada propriedade, de acordo com as características do processo. O principal objetivo é avaliar a existência de alguma falha conceitual nos processos utilizados e a necessidade de melhoria do banco de dados em relação a alguma das características. Neste estudo foi utilizada a matriz de qualidade dos dados para visualização de possíveis processos a serem melhor avaliados em futuras pesquisas.

Figura 34 – Matriz de parâmetros de qualidade dos dados.

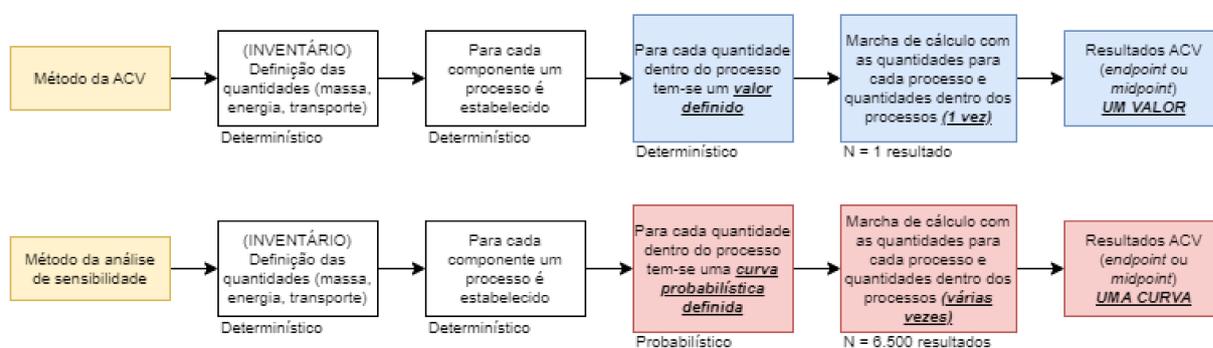
	1	2	3	4	5
Confiabilidade	Dados verificados com base em medições	Dados verificados baseados parcialmente em dados não-verificados ou assumidos	Dados não-verificados baseados parcialmente em dados assumidos	Estimativas qualificadas (e.g. por especialistas da área)	Estimativas não-qualificadas
Completeness	Dado representativo de todas as indústrias relevantes ao mercado, avaliado por tempo suficiente para evitar flutuações	Dado representativo de mais de 50% das indústrias relevantes ao mercado, avaliado por tempo suficiente para evitar flutuações	Dado representativo de parte das indústrias (<< 50%) relevantes ao mercado, ou de toda a indústria porém avaliado por um período curto de tempo	Dado representativo de uma só indústria relevante ao mercado ou algumas indústrias por um período curto de tempo	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno grupo de indústrias por um período curto de tempo
Correlação temporal	Menos de três anos de diferença entre a data de aferição do processo e a ACV realizada	Menos de seis anos de diferença entre a data de aferição do processo e a ACV realizada	Menos de dez anos de diferença entre a data de aferição do processo e a ACV realizada	Menos de quinze anos de diferença entre a data de aferição do processo e a ACV realizada	Ano dos dados desconhecido ou mais de quinze anos de diferença entre a data de aferição do processo e a ACV realizada
Correlação geográfica	Dados da área em estudo	Média de dados de uma área abrangente na qual encontra-se a área em estudo	Dados de área com condições similares de produção	Dados de área com condições parcialmente similares de produção	Dados de área distinta do local do estudo ou área desconhecida
Correlação tecnológica	Dados dos mesmos processos, materiais e sistemas utilizados no estudo confeccionados pela empresa selecionada	Dados dos mesmos processos, materiais e sistemas utilizados no estudo confeccionados por outra empresa	Dados dos mesmos processos, materiais e sistemas utilizados no estudo, porém com diferente tecnologia	Dados de processos, materiais e sistemas relacionados aos selecionados para o estudo	Dados em processos, materiais e sistemas relacionados aos selecionados para o estudo, em escala laboratorial ou de diferentes tecnologias

3.4.8 Análise de sensibilidade dos resultados

De acordo com a NBR 14040 (ABNT, 2014), a análise de sensibilidade serve para avaliar os efeitos das definições de projeto para os resultados obtidos e consequentes tomadas de decisão. Para tal, podem ser parametrizados tanto as variáveis de entrada, por meio de curvas probabilísticas de valor, como os processos utilizados. Optou-se por utilizar os parâmetros de entrada (energia, massa dos componentes, momento de transporte) dos sistemas de modo determinístico, de modo que não foram inseridas curvas probabilísticas. Porém, os processos do Ecoinvent apresentam curvas de probabilidade de acordo com o estudo de formulação do inventário do processo. Ou seja, existem variações de acordo com a quantidade de parâmetros de entrada e saída de materiais, energia e transporte para cada um dos processos modelados.

Desse modo, pode-se efetuar a análise de sensibilidade dos processos por meio de simulações de Montecarlo. O objetivo é apresentar as possíveis distribuições probabilísticas dos resultados finais, normalizados e ponderados, conforme a metodologia apresentada nas seções anteriores. Ou seja, ao invés de determinar os valores dos parâmetros internos aos processos e seguir a sequência de cálculo normatizada da ACV, são atribuídos valores probabilísticos de acordo com cada uma das curvas. Esses valores por si são utilizados até o final do cálculo obtendo um valor específico para o impacto final. Ao simular diversas vezes, obtém-se curvas que estimam a distribuição probabilística final dos resultados. A Figura 35 mostra um fluxograma demonstrativo do processo de análise de sensibilidade executado.

Figura 35 – Fluxograma da análise de sensibilidade por meio de simulação de Montecarlo.



A análise de sensibilidade foi realizada de modo a poder verificar a variabilidade dos resultados em subgrupos dos resultados. Reitera-se que, similarmente à ACV específica de cada cenário, foram utilizados os coeficientes fixos de ponderação e normalização descritos na seção sobre agrupamento de resultados. Desse modo, foram avaliadas as variações em:

- *Midpoint* - Para cada indicador ReCiPe 2016;
- *Endpoint* - Agregados os indicadores com mesma unidade final (DALY, espécies.ano e USD2013);
- *Endpoint* - Agregado em pontuação final pós ponderação e normalização.

A primeira etapa, *midpoint*, foi realizada de modo a compreender a variabilidade dos resultados sem nenhuma transformação. Ou seja, foi realizada de modo a compreender se existe alguma tendência probabilística importante de ser averiguada para as comparações realizadas entre cenários para um indicador. A segunda e terceira etapa, *endpoint*, foram realizadas de modo a compreender possíveis alterações na tomada de decisão devido à variabilidade dos resultados. É válido ressaltar que uma das grandes limitações observadas é o custo computacional da simulação de Montecarlo pelo

OpenLCA, limitando o número possível de resultados. Para o presente estudo foram limitados os resultados em 6500 simulações por cenário, devido ao tempo demandado. Em futuras análises pode-se utilizar *clusters* de simulação que otimizem e obtenham mais resultados. Crê-se, todavia, que os presentes resultados são suficientes para análise de dispersão dos indicadores.

3.4.9 Considerações finais da ACV

A ACV é uma metodologia bem estabelecida na academia e apresenta procedimentos consolidados de modo a padronizar ao máximo possível a execução. Porém, sabe-se que, por se tratar de uma análise complexa com inúmeros processos e definições, ACVs de mesmo escopo e objeto realizadas por diferentes pesquisadores podem obter resultados diferentes. Desse modo, a pesquisa foi realizada com o intuito de compreender ao máximo os princípios citados na NBR 14040 (ABNT, 2009a). Características como iteratividade, transparência, completeza e prioridade à abordagem científica são revisitadas durante a execução do estudo, de modo a avaliar o escopo e enquadrar procedimentos condizentes com o objetivo.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO MÉTODO

Neste capítulo foram apresentadas as etapas do método, bem como definições e características almejadas durante a execução do estudo. Foram apresentadas definições acerca dos dimensionamentos e detalhamentos dos sistemas propostos, bem como características da ACV realizada. Nos próximos capítulos são apresentados os resultados obtidos, debates acerca do estudo e conclusões.

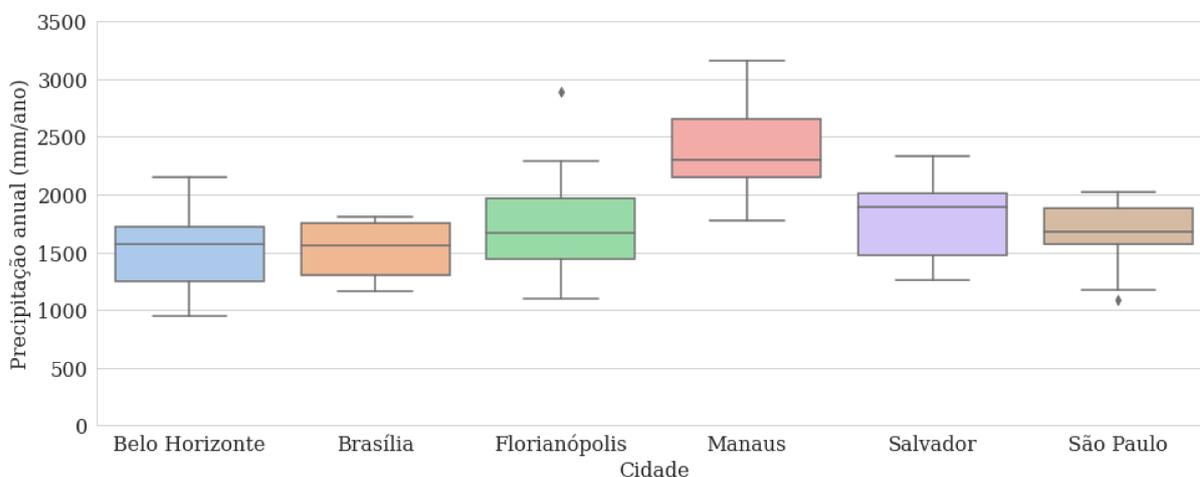
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa, bem como uma breve análise e discussão. O capítulo está dividido em: análise pluviométrica e de precipitação extrema, modelagem do sistema de captação de água pluvial, dimensionamento dos sistemas de pavimentação, e avaliação do ciclo de vida.

4.1 PLUVIOMETRIA, PRECIPITAÇÃO FUTURA E CURVAS IDF

A pluviometria foi agrupada por meio dos dados de pluviômetros obtidos junto ao INMET (2021) e as curvas IDF foram calculadas conforme os parâmetros reunidos na Tabela 5. A Figura 36 mostra o agrupamento anual das pluviometrias dos locais selecionados, em formato de diagrama de caixa. Percebe-se haver algumas diferenças nos padrões pluviométricos brasileiros, com Manaus apresentando mediana e valor máximo mensal bastante superior às demais cidades. Para as demais cidades, a média de precipitação anual fica entre 1500 e 2000 mm/ano. Percebe-se também haver diferenças entre a variabilidade de precipitação, com Brasília apresentando menor variação anual.

Figura 36 – Pluviometria anual das cidades selecionadas.



Em relação à precipitação mensal percebe-se resultado similar ao da análise anual. A Figura 37 mostra a distribuição das precipitações mensais nas seis cidades, também no formato de diagrama de caixa. Desse modo, Manaus apresenta mediana um pouco superior à das demais cidades. Também se percebe que as regiões de Brasília e Belo Horizonte possuem os menores valores, resultado concordante com análises prévias (MARTINS VAZ *et al.*, 2021b). Em relação à distribuição anual, a Figura 38 apresenta as distribuições anuais entre as seis cidades e os doze meses do ano. Percebe-se haver uma maior homogeneidade nas cidades de Florianópolis e

Manaus, enquanto as demais cidades apresentam estações secas e úmidas melhor definidas. Tal resultado é importante uma vez que o alinhamento do período úmido com o uso da água pluvial auxilia o sistema a ter maior eficiência.

Figura 37 – Pluviometria mensal das cidades selecionadas.

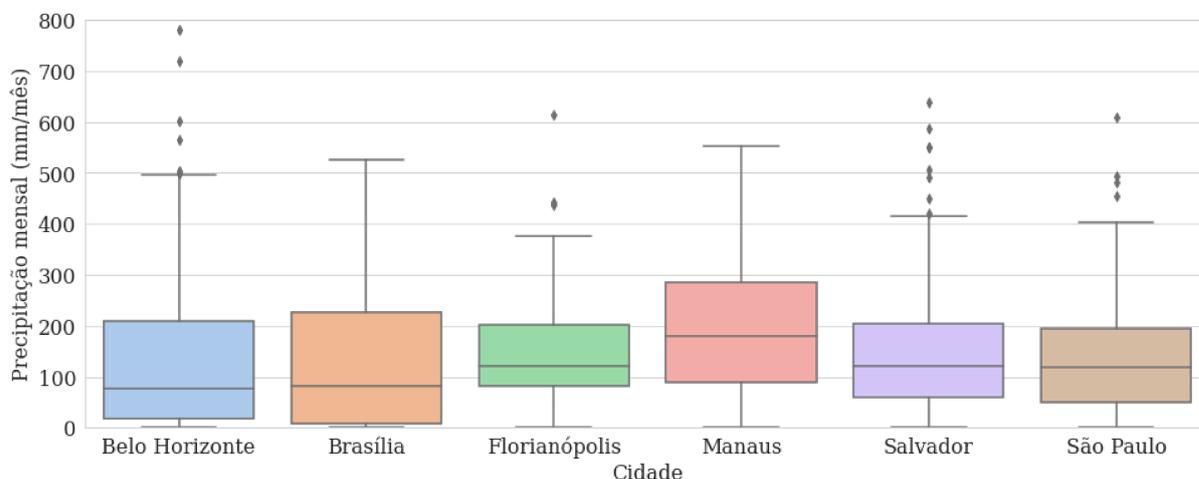
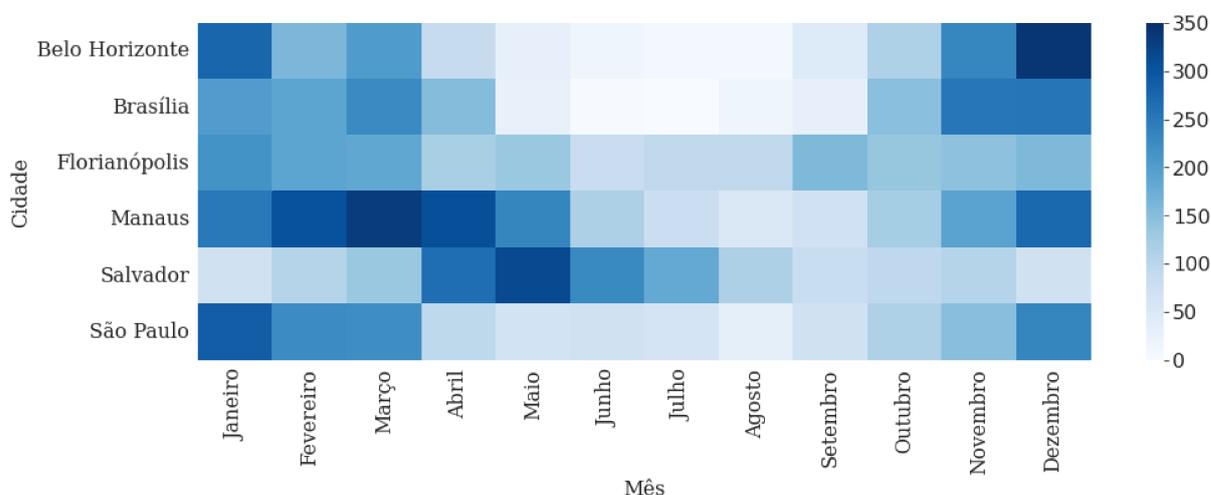
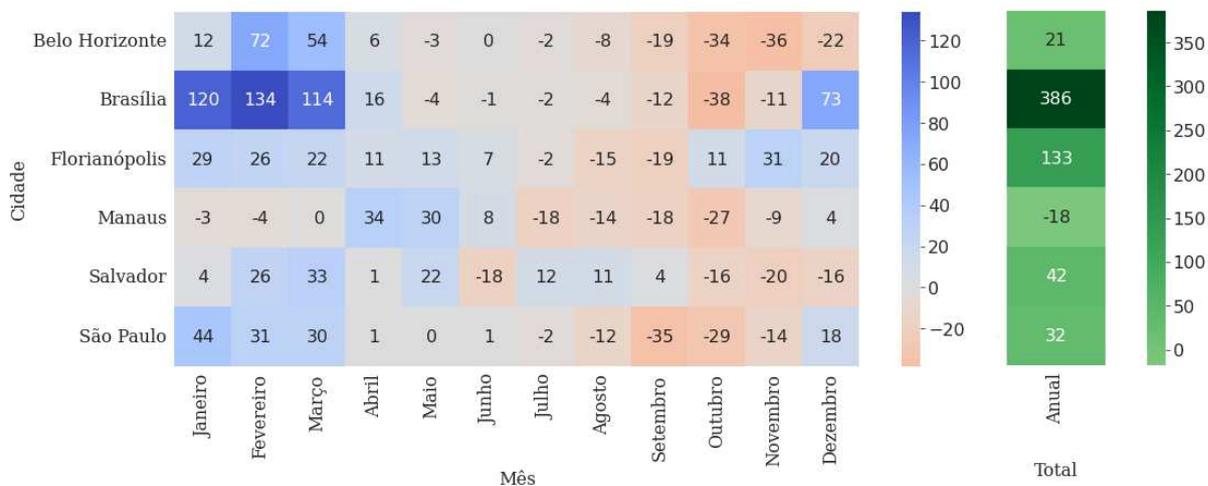


Figura 38 – Mapa com a distribuição mensal média das precipitações.



Também se pode comparar as pluviometrias atuais com as futuras, de modo a compreender mudanças nos padrões pluviométricos que influenciem nos resultados obtidos nas simulações de captação de água pluvial, bem como no dimensionamento da drenagem. Utilizando como referência o modelo de Santos (2018), pode-se comparar as precipitações existentes atualmente com as projeções futuras. A Figura 39 mostra um mapa de calor com as variações de precipitação observadas para o ano de 2099, de acordo com os dados de Santos (2018) para as seis cidades escolhidas. As variações são referentes ao aumento em relação à precipitação dos anos da década de 2010.

Figura 39 – Mapa com a projeção de variação mensal (mm/mês) e anual (mm/ano) de precipitação.



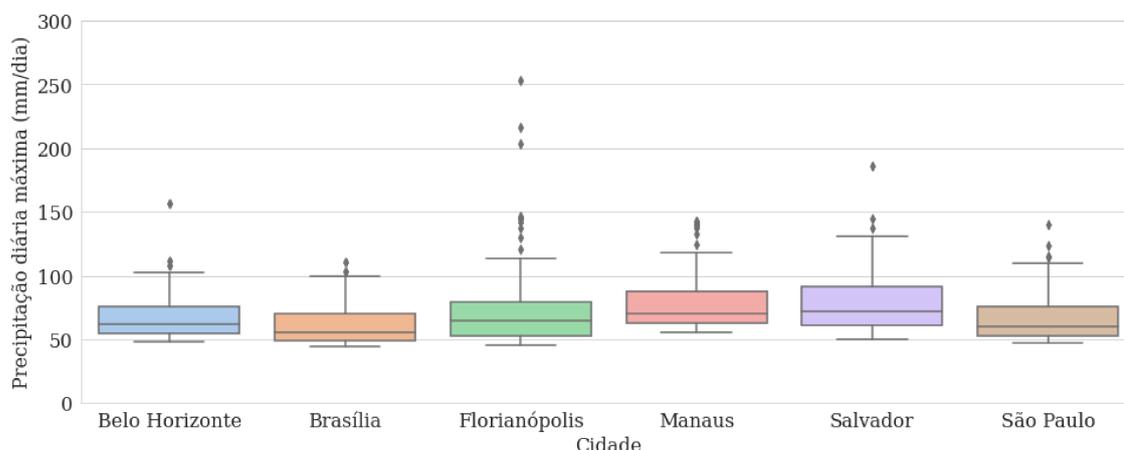
Percebe-se haver uma tendência para pequeno (entre 0 e 130mm) aumento da pluviometria média anual para as cidades de Recife, Belo Horizonte, São Paulo e Florianópolis. Para Brasília, esse aumento é superior, totalizando aproximadamente 400mm. Enquanto para Manaus percebe-se uma pequena redução na precipitação média anual, de aproximadamente 20mm. Tais previsões apresentam inúmeras incertezas atribuídas ao modelo de simulação e estão condicionadas à projeção de emissão de carbono do RCP 8,5. Porém servem como estimativa para compreensão da realidade hidrológica futura.

Para Brasília também se percebe uma ampliação das diferenças entre os períodos secos e úmidos na cidade, com aumento da pluviometria no verão e diminuição no inverno. Esse efeito ocorre nas demais cidades, em devida proporção, com aumento ou diminuição da precipitação em meses específicos. Tais efeitos são principalmente importantes, uma vez que o modelo de captação de água pluvial em edificações universitárias possui demandas com meses específicos, de modo que a distribuição anual de pluviometria afeta a efetividade do sistema.

Por outro lado, o modelo de projeções do IPCC (2021) aponta que há aumento de frequência e intensidade dos eventos extremos. Tais projeções são necessárias uma vez que influenciam na efetividade dos sistemas de drenagem propostos para as vias públicas. Em relação às precipitações extremas, duas visualizações foram propostas de modo a compreender o histórico pluviométrico das cidades. A primeira consta do maior volume precipitado em um dia. A Figura 40 mostra as 100 maiores precipitações diárias em cada cidade, agrupadas por meio do formato de diagrama de caixa. Pode-se perceber a existência de valores, destes 100 maiores registros, similares nas seis cidades, com Salvador e Manaus um pouco acima das demais. Porém, também percebe-se a existência de mais valores atípicos na cidade de Florianópolis, com o

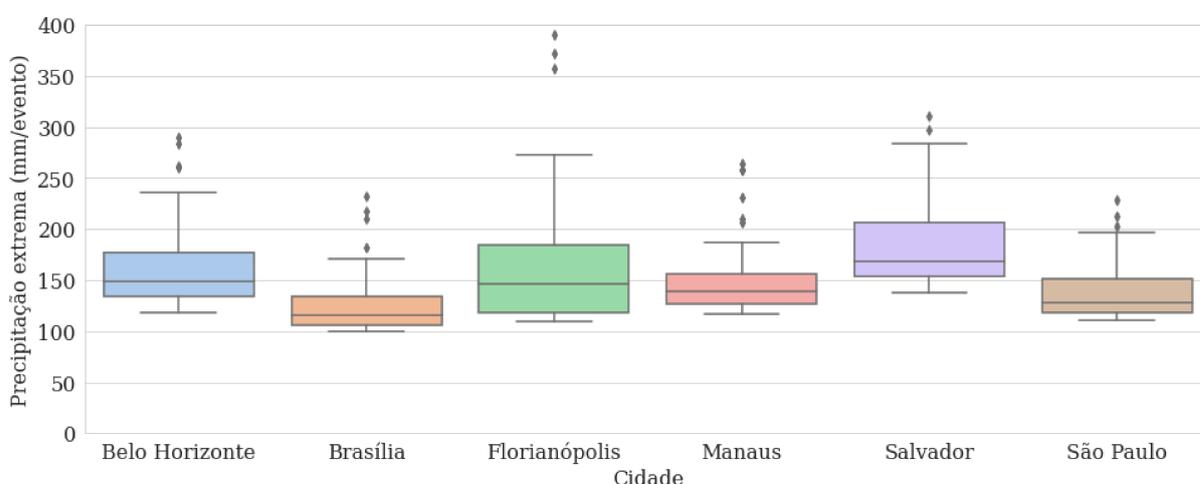
maior volume diário precipitado de aproximadamente 250mm.

Figura 40 – Pluviometria diária (100 maiores valores) das cidades selecionadas.



A segunda análise consta da agregação de cinco dias consecutivos, de modo a compreender os efeitos dos volumes agregados de precipitação ao longo de mais de um dia. O parâmetro é similar ao de demais estudos climatológicos, e possui base na estimativa das precipitações extremas, que podem ultrapassar a barreira temporal de um dia. A Figura 41 mostra os 100 maiores resultados obtidos para cada cidade em relação à precipitação extrema. Pode-se observar concordância com as maiores precipitações ocorrentes em Florianópolis, mesmo que a cidade apresente maior homogeneidade na precipitação média mensal. De modo geral, percebe-se as maiores precipitações somadas raramente passam de 300mm por evento, com somente três casos acima de 350 mm por evento, e todos em Florianópolis.

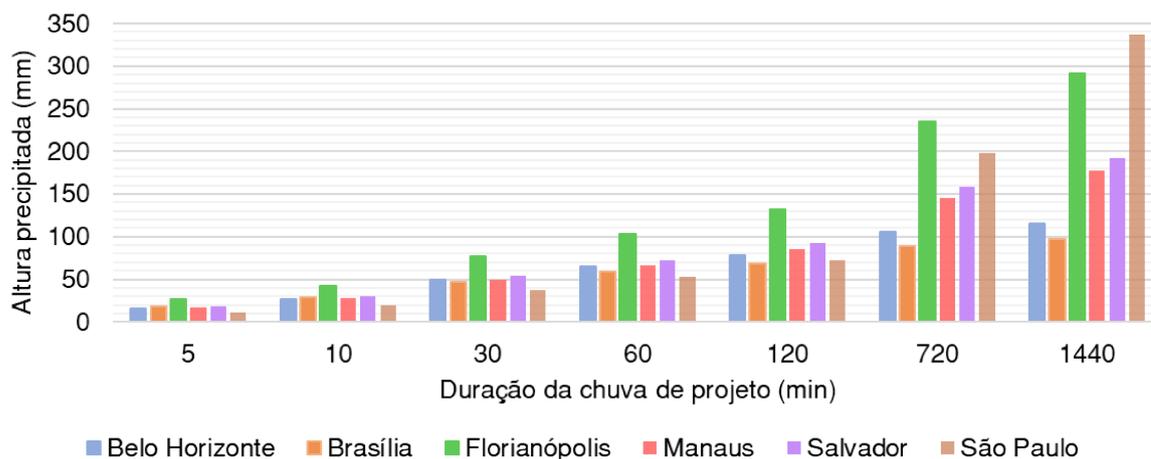
Figura 41 – Pluviometria extrema (100 maiores valores de agrupamentos de 5 dias) das cidades selecionadas.



A comparação sequencial é com as curvas IDF das seis cidades. A curva IDF fornece a precipitação para cada evento, dados os parâmetros de tempo de recorrência

e duração da chuva de projeto. Se multiplicada a precipitação obtida pela duração da chuva de projeto, tem-se o volume a ser admitido pela estrutura de drenagem ou contenção. A Figura 42 mostra os volumes incidentes durante a chuva de projeto, obtidos com os parâmetros específicos para as seis cidades.

Figura 42 – Volumes precipitados obtidos por meio das curvas IDF.



Considerando o período de 60 minutos e o tempo de recorrência de dez anos, mínimos exigidos pela ABNT 16416 (ABNT, 2015), obtêm-se volumes entre 53 e 103 mm. Percebe-se que Florianópolis possui uma curva IDF bastante conservadora, porém condizente com a realidade, uma vez que é uma das cidades com maior número de ocorrências de precipitações extremas. As demais cidades apresentam pouca variação do volume indicado, com valor máximo de 72 mm.

4.2 CONSUMO HÍDRICO DE EDIFICAÇÕES UNIVERSITÁRIAS

Para simulação do potencial de economia de água potável, também se fez necessário avaliar o consumo hídrico da edificação avaliada. Por se tratar de uma edificação modelo, obtida como referência, tentou-se compreender as potenciais variações do parâmetro para demais aplicações. Por exemplo, a variação mensal do uso de água durante o ano é notável em edificações universitárias, uma vez que correspondem aos períodos letivos e de férias. Também se optou por utilizar o consumo médio anual dos últimos anos disponíveis, de modo a abranger as variações interanuais. A Figura 43 mostra o consumo hídrico mensal da edificação modelo e a Figura 44 mostra o consumo médio diário preparado para a simulação no Netuno. Sabe-se que entre as cidades pode haver variação no padrão de consumo das edificações universitárias, porém, de modo a simplificar a abordagem realizada, utilizou-se o modelo obtido como referência.

Figura 43 – Consumo mensal do CTC durante o período disponível de faturas.

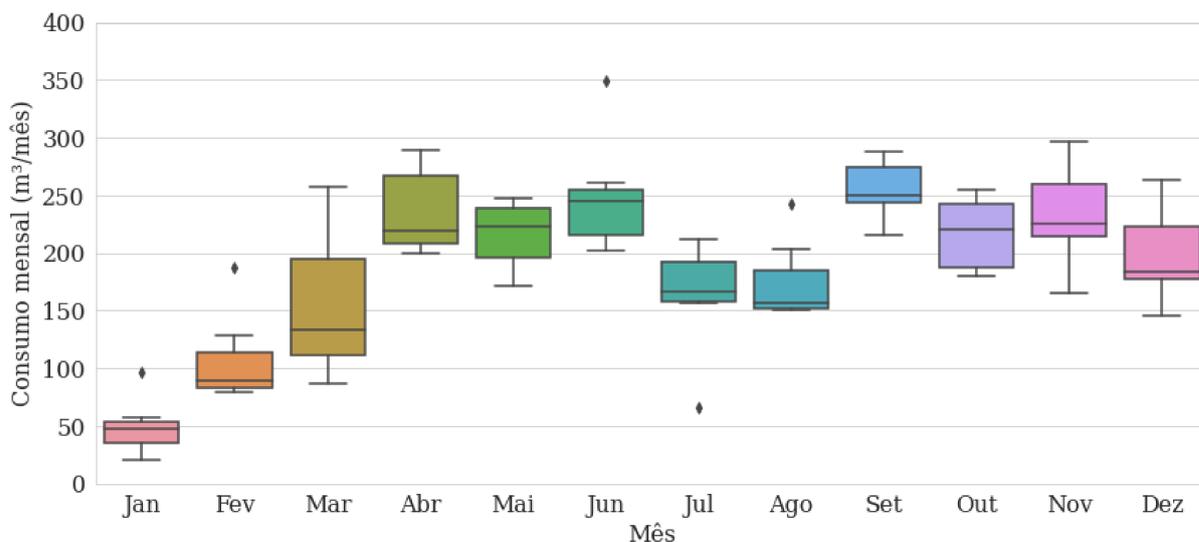
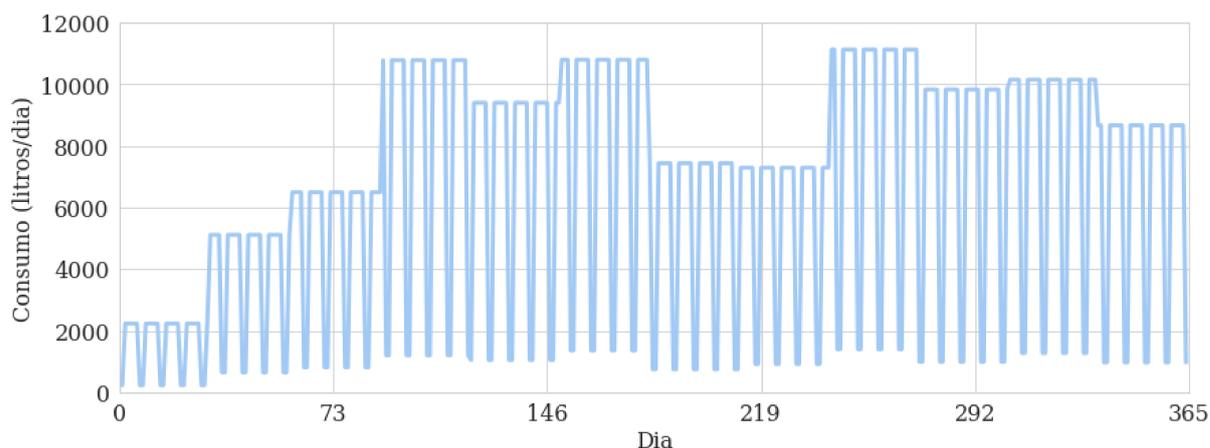


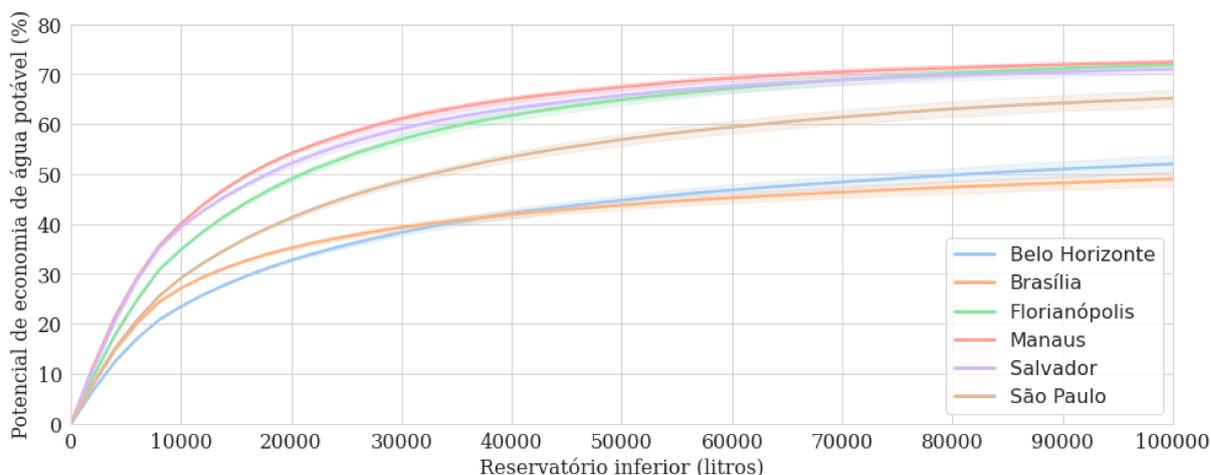
Figura 44 – Consumo diário do CTC utilizado na simulação.



4.3 MODELAGEM DOS SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL

Os sistemas de captação de água pluvial foram dimensionados por meio do programa Netuno (GHISI; CORDOVA, 2014). A Figura 45 mostra os potenciais de economia de água potável obtidos para cada volume de reservatório inferior e cidade simulados. A variação demonstrada pela hachura em torno da linha representa os valores máximos e mínimos obtidos de cada cidade, dados os cenários simulados. O valor máximo é representado pelo cenário D, captação por meio de telhado e pavimento. O valor mínimo é representado pela captação somente no telhado, ou somente no pavimento de asfalto.

Figura 45 – Potencial de economia de água potável para os diferentes reservatórios inferiores simulados.



Percebe-se que as cidades com maiores índices pluviométricos, e principalmente com pluviometria melhor distribuída durante os meses de maior consumo hídrico, apresentam maior potencial de economia de água potável para os menores valores de reservatório. Desse modo, Florianópolis, Manaus e Salvador destacam-se por mais facilmente atingirem a assíntota do valor máximo de economia de água potável. São Paulo demonstra-se uma cidade com resultados intermediários, enquanto Brasília e Belo Horizonte apresentam os menores potenciais de economia de água potável.

Para os volumes ideais de reservatório inferior, indicados pelo programa, a diferença entre o cenário B e D é de aproximadamente 3%. Ou seja, dada a capacidade de fornecimento hídrico do sistema alternativo, a diferença entre áreas de captação não gerou amplas diferenças no potencial final de economia de água potável, sendo a definição do volume de reservatório muito mais influente. O Apêndice B mostra os resultados separados para cada cidade, de modo a melhor visualizar a curva de eficiência, com os reservatórios inferiores simulados e respectivos potenciais de economia de água potável.

A Tabela 10 mostra os potenciais de economia de água potável com o reservatório pluvial inferior ótimo de cada cidade. Para a ACV, foi utilizada a cidade de Florianópolis como referência, com o respectivo volume de 45.000 litros. Os demais reservatórios ideais variaram entre 30.000 e 46.000 litros, com o menor respectivo a Brasília e o maior a São Paulo. Reitera-se que as diferentes cidades apresentariam diferentes parâmetros simulados em inventários de ACV, como drenagem, pavimentos, pluviometria, energia para fornecimento hídrico, entre outros. Discussões acerca da otimização ambiental, em possíveis futuros trabalhos, foram também realizadas na interpretação.

Tabela 10 – Potencial de economia de água potável (%) para o reservatório ótimo.

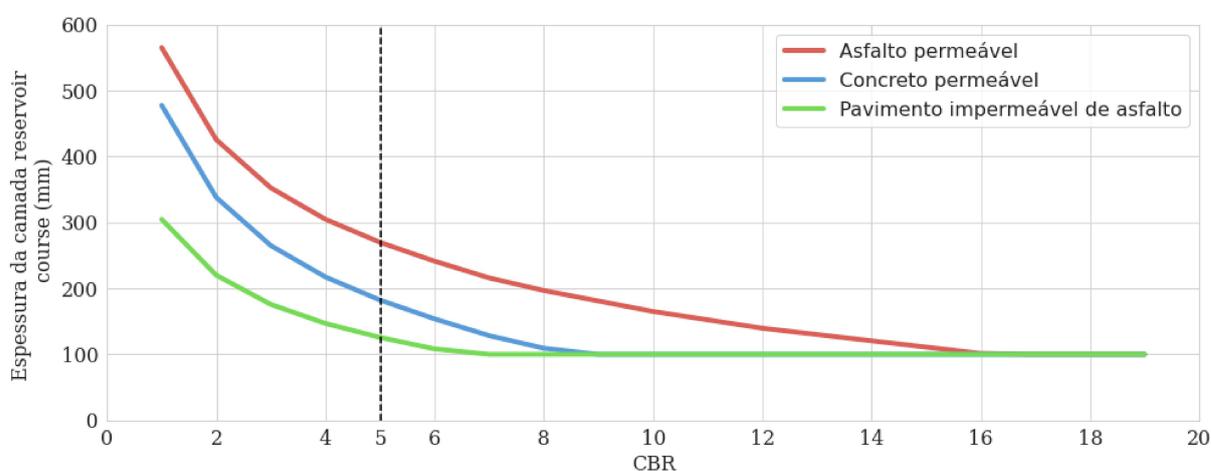
Cenário	Cidade					
	Belo Horizonte	Brasília	Florianópolis	Manaus	Salvador	São Paulo
B	39,05	37,98	62,15	65,49	61,10	53,02
Ca	39,05	37,98	62,15	65,49	61,10	53,02
Cc	40,08	38,20	62,60	65,76	61,57	53,46
Da	42,33	39,88	64,45	66,94	63,62	56,65
Dc	42,41	39,94	64,54	67,02	64,35	56,72
Volume ótimo (litros)	38.000	30.000	45.000	38.000	40.000	46.000

4.3.1 Pavimento do estacionamento

Nas próximas seções são apresentados os resultados do dimensionamento do pavimento permeável, com suas diferentes configurações. O resultado da seção foi a definição das camadas dos pavimentos, nos diferentes cenários, para posterior uso no inventário da ACV.

4.3.1.1 Dimensionamento estrutural

O dimensionamento estrutural foi realizado por meio da metodologia AASHTO (1993) com as respectivas variáveis para os três pavimentos propostos. Sabe-se que as espessuras do pavimento e a capacidade estrutural dependem também do subleito, material variável de acordo com o local de instalação da infraestrutura. Desse modo, a fim de atender os requisitos mínimos dos manuais de pavimentação permeável, adotou-se o ISC como o valor mínimo igual a 5%. Tal valor é concordante com o estudo anterior de Martins Vaz *et al.* (2021b), bem como com o valor de ISC obtido para a edificação modelo. A Figura 46 mostra o resultado do dimensionamento estrutural.

Figura 46 – Espessura da camada *reservoir course* para atendimento estrutural.

Devido aos maiores coeficientes estruturais das camadas impermeáveis, o pavimento impermeável apresentou a menor espessura necessária para a sub-base (correspondente a *reservoir course*). Em seguida, o pavimento com concreto permeável apresentou a segunda melhor resposta estrutural, uma vez que a camada de revestimento possui maior espessura em relação à alternativa asfáltica. Por fim, o concreto asfáltico apresentou a maior necessidade de espessura para a camada *reservoir course*. Conforme mostra a Figura 46, para o ISC de 5%, os pavimentos necessitam de 130, 180 e 270 mm de *reservoir course* para os revestimentos de asfalto impermeável, concreto permeável e asfalto permeável, respectivamente.

4.3.1.2 Dimensionamento hidráulico

A primeira etapa do dimensionamento hidrológico-hidráulico foi realizada por meio da simulação horária do balanço hídrico do pavimento. A vazão de entrada foi inserida por meio dos volumes precipitados em 24 horas, mostrados na Figura 42. A vazão de saída foi simulada por meio do uso de drenos com capacidade calculada por meio da Equação de Manning, com uso de coeficiente respectivo ao material. Os dados utilizados foram apresentados na Tabela 8. Com o uso de drenos de 10 cm de diâmetro é esperada uma vazão máxima de drenagem de $21 \text{ m}^3/\text{h}$, com drenos de 15 cm é esperada uma vazão máxima de $62 \text{ m}^3/\text{h}$ e com drenos de 20 cm é esperada uma vazão máxima de $133 \text{ m}^3/\text{h}$.

Desse modo, foram definidos drenos principais com diâmetro de 15 ou 20 cm, dependendo do arranjo proposto, e drenos secundários com diâmetro de 10 cm, de modo a atender e ultrapassar as vazões simuladas. A Figura 47 mostra um croqui realizado para as regiões do pavimento consideradas, bem como os drenos de 20, 15 e 10 cm, em amarelo, vermelho e verde, respectivamente. Em magenta são apresentadas as tubulações de drenagem, em ciano as calhas e em azul a tubulação de recalque. Percebe-se que somente para a parte superior do estacionamento foi necessário o uso de drenos de 20 cm de diâmetro.

Os resultados da simulação no *Permeable Design Pro* (ICPI, 2021) são mostrados nas Figuras 48 a 50, agrupados de acordo com a variável calculada. Foi demonstrado o caso crítico, representado pela região com dreno principal de 20 cm, após acúmulo de vazão dos demais drenos. Percebe-se que o uso de drenos secundários de 10 e 15 cm de diâmetro foi suficiente para garantir que a altura de água nas camadas granulares não atingisse a superfície. Porém, foi necessário utilizar um dreno principal de 20 cm, receptor dos drenos de 10 e 15 cm. Desse modo, não é gerado escoamento superficial por acúmulo de água na estrutura. Também é interessante avaliar que o sistema funciona em sua capacidade máxima de drenagem do ramo principal por pelo menos seis horas em Florianópolis, o que influi diretamente no dimensionamento.

Figura 47 – Croqui do cenário D com a demonstração dos drens.



Figura 48 – Vazão dos drens profundos dos pavimentos permeáveis.

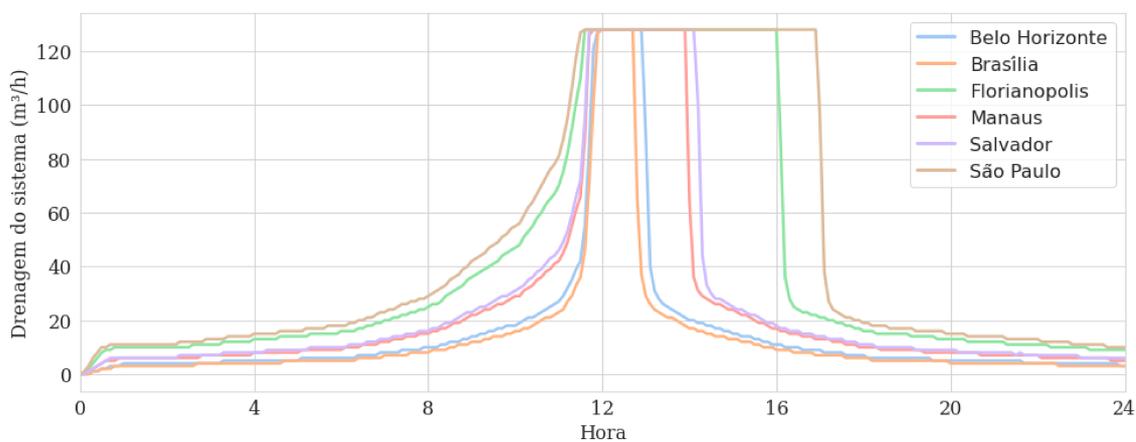


Figura 49 – Precipitação incidente no pavimento permeável.

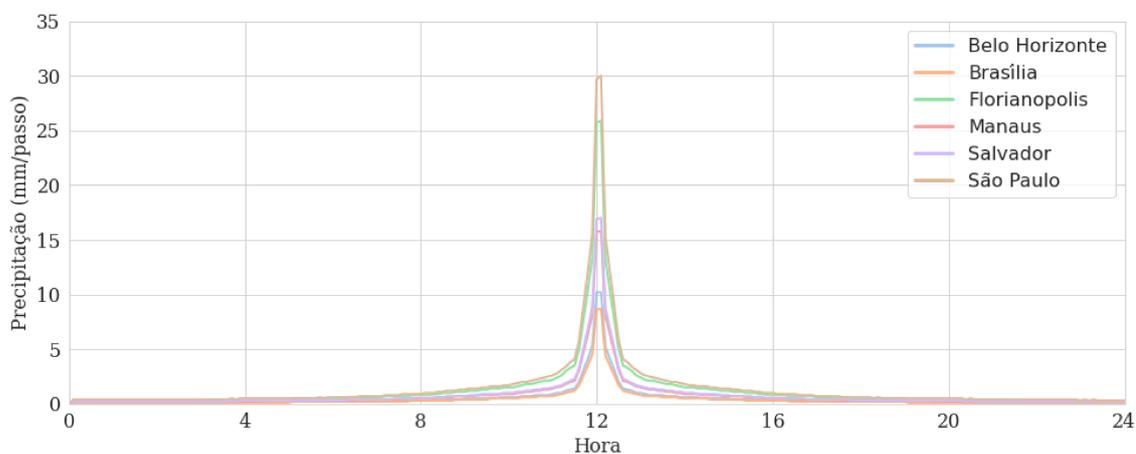
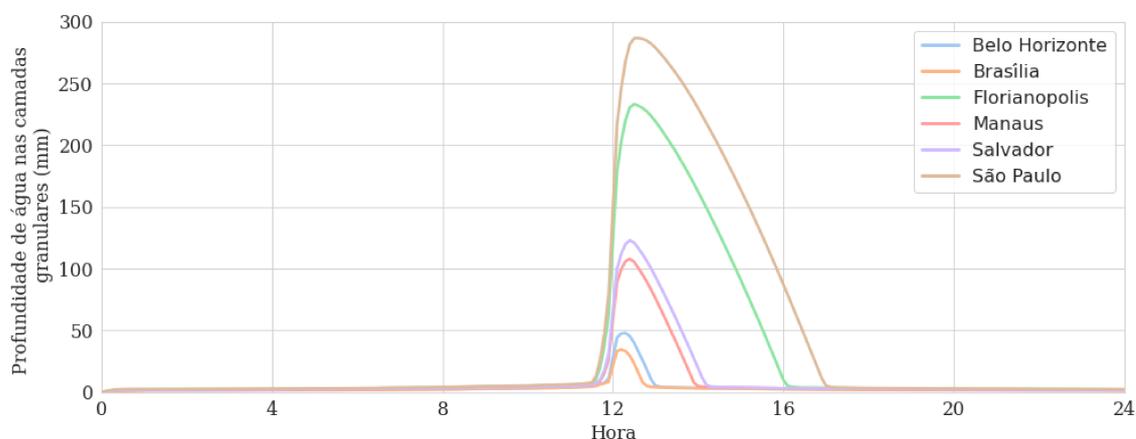


Figura 50 – Altura da lâmina de água na *reservoir course*.

Desse modo, a manutenção da drenagem é fundamental para o funcionamento do sistema. Na Figura 48 é mostrada a vazão de drenagem do pavimento; na Figura 49 é apresentada a precipitação por passo de simulação, definido em um décimo de hora, conforme discretização máxima do *Permeable Design Pro*; e na Figura 50 é apresentada a altura da lâmina de água no pavimento. Sem a manutenção da drenagem estimada podem ocorrer pontos de acúmulo de água ultrapassando as camadas granulares e gerando empocamento local. Os resultados obtidos para a drenagem do sistema (m^3/h), mostrados na Figura 49, são referentes à extravasão pelo dreno de 20 cm de diâmetro, conforme mostra a Figura 47. Também foram avaliadas as capacidades dos demais drenos, de modo que, para cada nó de junção de drenos, a capacidade à jusante fosse suficiente e não ocorresse acúmulo de água.

A escolha por utilizar a precipitação de 24 horas distribuída de acordo com o modelo III do NRCS demonstrou-se similar ao uso da curva IDF de 60 minutos. O tipo III do NRCS distribui 40% da precipitação diária extrema em uma hora, valor similar às curvas IDF de Florianópolis, Manaus e Salvador. Brasília e Belo Horizonte apresentaram percentuais de distribuição em uma hora superiores às curvas IDF, com a altura precipitada em 60 minutos representando 56 e 60% da precipitação de 24 horas, respectivamente. São Paulo apresentou o menor percentual, com a precipitação de 60 minutos representando 16% do volume precipitado de um dia. Assume-se que o mesmo tipo de distribuição serviu como boa simplificação para a modelagem de balanço hídrico, com concordância com casos extremos. Percebe-se um máximo de intensidade pluviométrica entre 80 a 280 mm/h , o qual ocorre por poucos minutos.

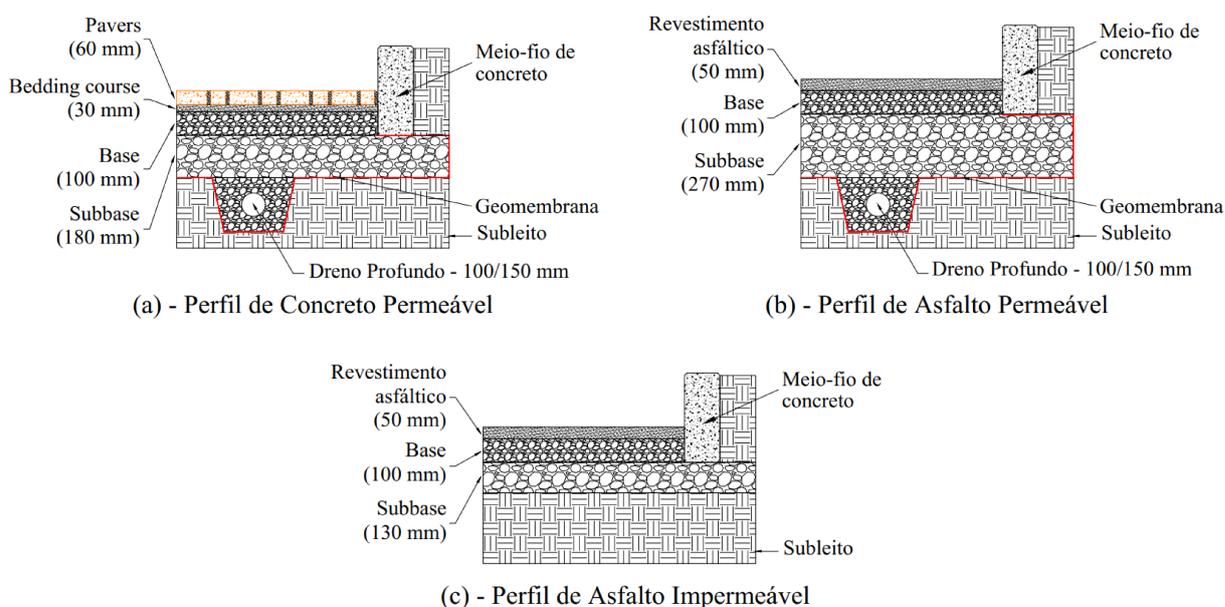
Na Figura 50 também se percebe que as situações mais críticas foram obtidas para São Paulo e Florianópolis. Para as demais cidades obtêm-se demandas de drenagem com menor vazão. Brasília e Belo Horizonte apresentaram lâmina de água de apenas 50 mm, menor que a *choker course*. Manaus e Salvador apresentaram situação intermediária, ultrapassando a espessura da *choker course*. Demonstra-se, dessa forma, como as diferenças nas curvas IDF impactam significativamente nas demandas

de drenagem do pavimento permeável.

4.3.1.3 Perfis e valores finais

Para ambos os pavimentos permeáveis, com revestimento de asfalto ou concreto, o dimensionamento estrutural foi dominante. Tal fato ocorre devido ao ISC do subleito ter sido escolhido como mínimo admissível, de 5%, podendo diferir da realidade local em estudos de caso. Também se atenta ao fato que optou-se pela utilização do aumento dos diâmetros de drenagem com 10 e 15 cm para os drenos secundários e 20 cm para os drenos principais, conforme disponibilidade e boas práticas do mercado. Para sistemas menos robustos em relação à drenagem, a condicionante hidráulica pode ser a requisitante do dimensionamento. A Figura 51 mostra os perfis finais obtidos para os pavimentos permeáveis.

Figura 51 – Perfis finais obtidos para os três pavimentos utilizados (sem escala).



Também se nota que para a cidade de São Paulo, representante das curvas IDF mais críticas, a altura da lâmina de água simulada (280 mm) igualou a espessura estrutural das camadas granulares do pavimento de concreto permeável (280 mm). Desse modo, atenta-se para esta diferenciação entre cidades, nas quais a discretização do modelo de drenagem pode modificar qual vertente, hidráulica ou estrutural, gera maiores requisitos de espessura. De qualquer forma, conforme a ACV foi realizada para a cidade de Florianópolis, têm-se as espessuras demonstradas na Figura 51 como suficientes para atender as demandas hidráulica e estrutural.

4.3.2 Drenagem do pavimento

Para o pavimento impermeável, devido a incapacidade de drenagem pela estrutura do pavimento, foram propostos sistemas de drenagem urbana convencionais. Desse modo, fez-se necessário dimensionar as bocas de lobo e galerias pluviais. O projeto foi realizado conforme manuais de drenagem (PMSP, 2012), indicando os quantitativos necessários para execução. Para o cenário com pavimento permeável foram indicados os usos de sistemas convencionais nas regiões adjacentes, conforme definições feitas para o projeto.

O uso do programa da ABTC (SEGNÍNI *et al.*, 2010) fez possível definir a classe de tubulações necessárias para drenagem do pavimento. Para todos os diâmetros avaliados foi obtido o tipo PS2 como mínimo estruturalmente aceito, o qual não demanda estrutura de aço e deve ser construído com concreto estrutural. As condições foram estabelecidas de acordo com as profundidades obtidas para o reservatório inferior e disposição dos tubos. Foram então avaliadas condições de compra de tubulações desse tipo, bem como os materiais necessários para assentamento de acordo com as melhores práticas de mercado. Todos os elementos foram introduzidos posteriormente no inventário da ACV.

Como exemplo dos casos propostos, a Figura 52 mostra o croqui do sistema para o estacionamento com pavimento impermeável e o sistema de captação de água pluvial dos telhados (cenário B). Foram divididos os pavimentos e telhados em subáreas para dimensionamento da drenagem, de modo que as vazões incidentes fossem compatíveis com os dispositivos projetados. A área total de pavimento para todos os cenários, permeável ou impermeável, a ser drenada é de 6800 m². A área total de telhado, com ou sem captação, é de 5000 m².

O sistema de bombeamento foi dimensionado conforme as Equações 13 e 15, obtendo diâmetro de recalque e de sucção de 25 e 32 milímetros, respectivamente. A motobomba selecionada possui potência nominal de 368W, equivalente a 1/2 Cavalo-Vapor (CV), atendendo a altura manométrica calculada de, aproximadamente, 14,5 metros. Para o sistema proposto, também foram quantificadas uma válvula pé de crivo, uma válvula ventosa, duas válvula de retenção, além de registros, joelhos, entradas e saídas de reservatório de modo a atender as condicionantes de instalações hidráulicas. Todas as peças foram contabilizadas para a perda de carga, de acordo com manuais de dimensionamento hidráulico (TIGRE, 2022). A Tabela 11 mostra um resumo dos volumes de reservatórios necessários, das motobombas definidas e dos volumes de água utilizados em cada cenário.

Figura 52 – Modelo da quantificação da drenagem do sistema - Exemplo do Cenário B com a precipitação de Florianópolis (sem escala).

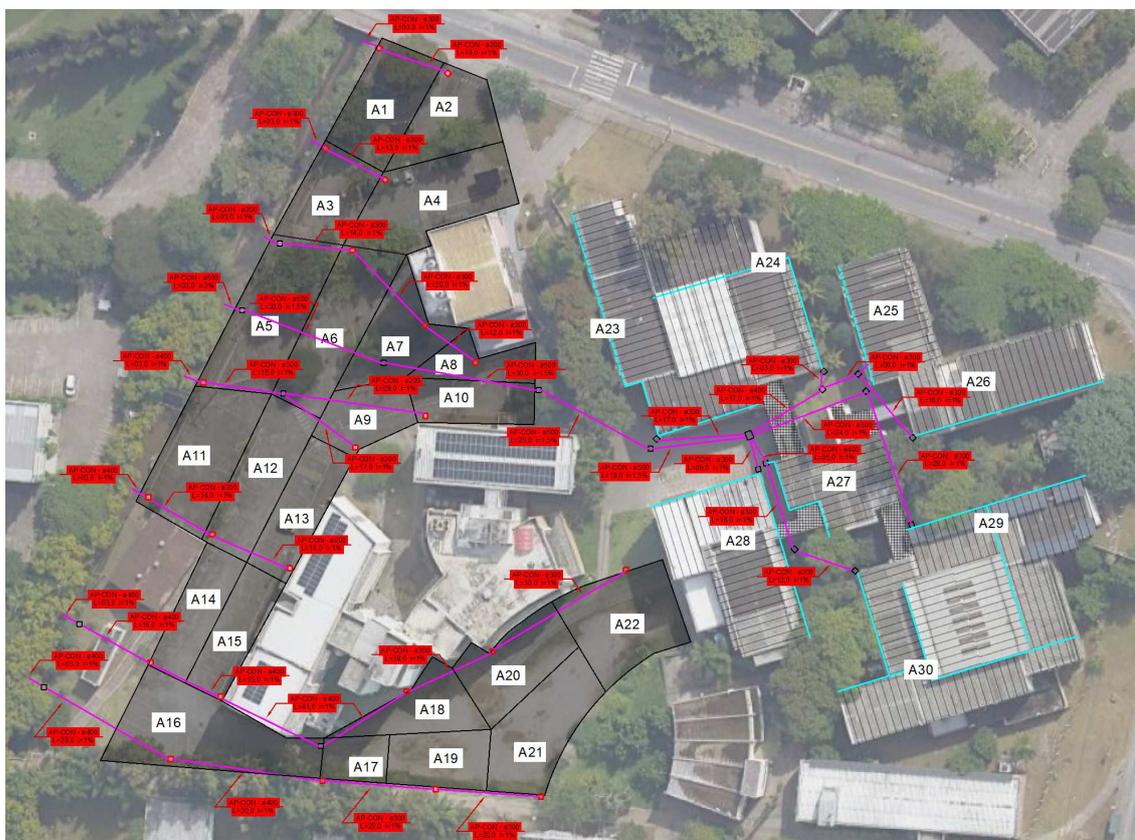


Tabela 11 – Resumo dos dispositivos hidráulicos dimensionados.

Componentes / Especificações	Cenário					
	A	B	Ca	Cc	Da	Dc
Demanda média de água potável (l/dia)	6184	2341	2341	2313	2198	2193
Demanda média de água pluvial (l/dia)	-	3843	3843	3871	3986	3991
Demanda máxima de água potável (l/dia)	12.000	4542	4542	4488	4266	4255
Demanda máxima de água pluvial (l/dia)	-	7458	7458	7512	7734	7745
Reservatório inferior de água potável (l)	15.000			9000		
Reservatório superior de água potável (l)	10.000			6000		
Reservatório inferior de água pluvial (l)	-			45.000		
Reservatório superior de água pluvial (l)	-			5000		
Potência motobomba água potável (CV)	1/2	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Potência motobomba água pluvial (CV)	-	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Funcionamento das motobombas (h/dia)	Calculado na seção 4.4.2.3					
Rendimento das motobombas (%)	50					

O quantitativo final do sistema de drenagem para Florianópolis é apresentado na Tabela 12. O inventário de materiais usado para a ACV foi melhor detalhado, a partir da Tabela 12, considerando os componentes necessários para cada elemento. Pode-se perceber que a quantidade de materiais necessários para a drenagem varia amplamente entre os cenários, demonstrando a compensação que o sistema de pavimentos

permeáveis apresenta. Ou seja, enquanto muitos trabalhos comparam diretamente sistemas de pavimentos permeáveis e impermeáveis, a falta de contabilização dos componentes de drenagem faz-se equivocada, uma vez que grande quantidade de material deve ser despendida para a correta drenagem do pavimento impermeável. Tal conclusão vai de acordo com a publicação de Antunes *et al.* (2020a).

Tabela 12 – Quantitativo de itens necessários para drenagem do estacionamento.

Cenário	A	B	Ca/Cc	Da/Dc
Número de bocas de lobo (itens)	22	22	5	5
Número de caixas de inspeção (itens)	20	20	19	18
Número de caixas especiais ¹ (itens)	1	-	1	1
Comprimento tubos PVC (metros)	-	34	57	57
Comprimento tubos de concreto (metros)	667	660	374	398
Comprimento drenos perfurados PEAD Ø200 (metros)	-	-	38	38
Comprimento drenos perfurados PEAD Ø150 (metros)	-	-	180	180
Comprimento drenos perfurados PEAD Ø100 (metros)	-	-	645	645
Manta impermeável para fundo do pavimento (m ²)	-	-	7500	7500

¹Caixas com dimensão superior à caixa de inspeção padrão.

Outro ponto interessante é a comparação entre os resultados do dimensionamento da drenagem nas diferentes cidades. A principal alteração foi obtida entre Florianópolis e São Paulo, das quais o dimensionamento apresentou diferenças de um diâmetro comercial na grande parte das tubulações propostas. Ou seja, devido à natureza discreta do dimensionamento, não há como indicar variação gradual, levando ao aumento do diâmetro das tubulações de 200 para 300 mm, e assim sucessivamente. Para a ACV foram utilizados os diâmetros obtidos pelo projeto para a cidade de Florianópolis.

4.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS SISTEMAS PROPOSTOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a ACV, bem como uma breve discussão acerca dos parâmetros e variáveis escolhidos. Divide-se a seção conforme os procedimentos da ACV: Objetivo e escopo, inventário, avaliação dos impactos e interpretação. A partir dessa etapa da dissertação, todos os dados de precipitação, transporte e energia são referentes a Florianópolis, retomando-se o debate das possíveis diferenças entre as cidades simuladas nas conclusões do projeto.

4.4.1 Objetivo e escopo

O primeiro resultado necessário após a definição do sistema de captação de água pluvial e do sistema de drenagem, com ou sem pavimento permeável, é a quantificação da unidade funcional. De modo a poder comparar os cenários propostos, faz-se

necessário obter sistemas que entreguem desempenho idêntico ao usuário. Conforme citado no método, três objetos de projeto são entregues:

- Função 1: Fornecimento hídrico de 2257 m³ de água ao ano para a edificação. Durante os 20 anos de vida útil do sistema totalizam-se 45.143 m³ de água fornecida;
- Função 2: Drenagem da área de pavimento e do telhado, totalizando 11.800 m². Drenagem realizada de acordo com os manuais de melhores práticas e com os níveis de aceitabilidade (tempo de retorno) indicados;
- Função 3: Pavimentação da área de estacionamento de 6800 m², permeável ou impermeável. Uso da área de estacionamento por 20 anos, com as devidas manutenções e benefícios durante o período de análise.

Reitera-se que o horizonte de análise é de 20 anos, o que leva ao processo que alguns componentes possuam vida útil superior e alguns vida útil inferior a do sistema. Para os componentes com vida útil superior foi considerado o impacto total do componente. A consideração foi similar a demais projetos, de modo a simplificar o processo de inventário e obter cenário pessimista acerca da reutilização. Para componentes com vida útil inferior a do sistema foi considerada a reposição da peça, com nova incorporação do impacto inicial do componente. A Tabela 13 mostra a vida útil dos componentes e o número de reposições necessárias durante a vida do sistema.

Tabela 13 – Vida útil dos componentes avaliados na ACV.

Componente	Vida útil (anos)	Fonte	Nº de reposições
Reservatórios PEAD	50	Ghimire <i>et al.</i> (2019)	-
Reservatórios Concreto armado	63	ABNT (2021)	-
Impermeabilização Caixa d'água	10	ABNT (2021)	1,00
Tubulações/conexões	50	ABNT (2021)	-
Dispositivos captação	50	Technik (2022)	-
Conjunto mangueira boia	25	Technik (2022)	-
Realimentador	10	Ghimire <i>et al.</i> (2019)	1,00
Motobombas	10	ABNT (2021) / Ghimire <i>et al.</i> (2019)	1,00
Clorador flutuante	5	SODRAMAR (2021)	3,00
Válvula solenoide	7,5	Ghimire <i>et al.</i> (2019)	1,67
Pavimento convencional	20	Grael <i>et al.</i> (2021)	-
Pavimento permeável asfáltico	20	Antunes <i>et al.</i> (2022)	-
Pavimento permeável de PICP	20	Antunes <i>et al.</i> (2022)	-
Sistema de águas pluviais	25	ABNT (2021)	-

4.4.2 Inventário

4.4.2.1 Transporte

O transporte foi quantificado por meio da massa dos materiais presentes no inventário e a distância de transporte. A distância foi calculada entre o local de produção da peça, ou material, e o canteiro de obras, localizado na rua "Delfino Conti, 280-368 - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-370". Para melhor visualização das distâncias consideradas, a Tabela 14 mostra os componentes e deslocamentos necessários. Foram utilizados como referências os trabalhos de Antunes *et al.* (2020a) e Marinowski e Ghisi (2019), os quais fizeram análises de ACV também na cidade de Florianópolis com materiais similares.

4.4.2.2 Materiais

A realização do inventário de materiais fez-se por meio de estudo dos componentes necessários para os sistemas e de estudos similares ao projeto. A quantificação dos componentes de drenagem foi feita conforme o projeto indicado nas Figuras 47 e 52, bem como dos demais cenários. A quantificação do sistema de captação por telhados foi feita conforme estudos similares e definição dos componentes necessários (RAINMAP, 2017; MARINOSKI; GHISI, 2019). A quantificação do sistema de pavimentação foi realizada conforme o projeto hidráulico e estrutural. Por fim, apresenta-se no Apêndice C o inventário finalizado dos seis cenários propostos, bem como o momento de transporte (tkm) necessário para as etapas iniciais e finais do sistema.

4.4.2.3 Energia necessária para bombeamento

O sistema dimensionado para os seis cenários está apresentado na Tabela 11, contemplando dois tipos de motobombas. Para todos os cenários alternativos, o consumo médio de água pluvial é de aproximadamente 4000 litros por dia e de água potável de 2400 litros por dia. De acordo com modelos existentes no mercado foram definidas as motobombas de 1/2 CV (373 Watts) com vazão de 3,0 m³/h e da motobomba de 1/3 CV (249 Watts) com vazão de 1,5 m³/h.

Desse modo, para o cenário base tem-se o funcionamento médio diário de 2,10 horas para a motobomba de água potável. Para os demais cenários tem-se o funcionamento da motobomba de água pluvial por 2,67 horas e da motobomba de água potável por 1,60 horas. A energia de bombeamento também é somada às demandas de energia de stand-by e aos arranques do sistema. Para o cenário base tem-se o consumo de 5.907,15 kWh, enquanto para os demais cenários tem-se o consumo de 8.070,31 kWh. Este consumo é referente à soma das energias necessárias para as motobombas de água pluvial e potável durante a vida útil do sistema.

Tabela 14 – Distância de transporte para os diferentes componentes utilizados na ACV.

Componentes	Endereço do fabricante	Distância (km)
Reservatórios de água em PEAD	Rod BR 101, Km 64,7, S/N Galpão 1, Corveta – Araquari, SC – CEP: 89245-000.	154
Realimentador		
Conjunto mangueira de boia	Rod. Virgílio Várzea, 259 Monte Verde	7,4
Freio d'água	Florianópolis - SC 88032-000	
Sifão extravasor		
Clorador flutuante	R. Itajaí, 1220 - Limoeiro, Brusque - SC, 88356-305	119
Motobombas	Rua Hans Dieter Schmidt, 1501 Distrito Industrial CEP 89219-504 Joinville, SC	189
Tubos e conexões	Av. Edmundo Doubrava, 1001 - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-502	190
Concreto	Rod. José Carlos Daux, 5800 - Saco Grande, Florianópolis - SC, 88032-005	10
Formas de madeira	Rod. José Carlos Daux, 1327 - João Paulo, Florianópolis - SC, 88030-000	5,5
Barras de aço	ArcelorMittal Vega, BR-280, km 11 - Rocio Grande, São Francisco do Sul - SC, 89240-000	183
Manta impermeabilizante (PEAD)	R. Xavantes, 54 - Atiradores, Joinville - SC, 89203-900	179
Impermeabilização do reservatório (asfáltica)	Km, Rod. Romildo Prado, 14 - Sítio da Moenda, Itatiba - SP	754
Ligante asfáltico modificado	R. João Bettega, 3500 - Fazendinha/Portão	308
Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	Curitiba - PR, 81350-000	
Britas, pó de pedra, areia	Rodovia Dr. Antônio Luiz Moura Gonzaga, 2146 - Rio Tavares, Florianópolis - SC, 88048-300	12
Tijolo cerâmico	Rua Osni Kuhnen, 520 - Alto Aririu, Palhoça - SC, 88135-609	29
Blocos de concreto para pavimentação	Rua Abraão de Souza e Silva, 1300, Bairro Bateas, Brusque/SC - CEP 88355-570	120
Central de reciclagem da COMCAP	Rod. Admar Gonzaga, 214-412 - Itacorubi, Florianópolis - SC, 88034-000	6,2

4.4.2.4 Disponibilização de água potável

Os impactos referentes ao fornecimento de água potável foram obtidos por meio da indicação do volume a ser disponibilizado durante toda a vida útil. O processo referente utilizado foi o "*tap water production, conventional treatment / tap water / Cutoff, U - BR*", do *Ecoinvent 3.8*. O processo contempla os impactos de uma estação de tratamento convencional, com coagulação, decantação, filtração e desinfecção, condizente com a qualidade desejada e o padrão convencional brasileiro de tratamento. Todavia, a energia para tratamento e disponibilização da água tratada foi modificada,

de modo a condizer com o índice do SNIS (2020) para o estado de Santa Catarina. Desse modo, foi modificado o parâmetro de "energia demandada por água tratada", indicado no processo do *Ecoinvent*, para 0,37 kWh/m³.

O volume de água fornecido, por sua vez, foi calculado com base nos potenciais de economia disponibilizados na Tabela 10. Como referência, o cenário base demandou 45.143 m³ durante toda a vida útil do sistema, enquanto os demais cenários apresentaram demanda entre 16.008 e 17.087 m³. Desse modo, as diferenças obtidas nos potenciais de economia de água potável se traduziram em impacto ambiental por meio dos processos para o tratamento e distribuição da água.

4.4.2.5 Desinfecção da água pluvial

Outro componente inserido foi o cloro necessário para a desinfecção da água pluvial captada. A massa de cloro necessária para desinfecção foi calculada de modo a atender as concentrações preconizadas por meio da NBR 15527 (ABNT, 2019). Também foi optado por um processo de produção que condiz com o produto a ser utilizado. Desse modo, a massa de hipoclorito de sódio utilizada no inventário foi estimada em 35 kg durante a vida útil do sistema.

4.4.2.6 Recorrência e manutenção

Conforme mostrado na Tabela 13, cinco componentes apresentam vida útil menor que a do sistema, enquanto os demais ultrapassam a vida útil. Devido às considerações de disposição final, considerou-se que qualquer dispositivo com vida útil superior a do sistema não possui nenhum benefício ambiental pelo reúso ou reciclagem do sistema. Ou seja, não foram divididos os impactos pela parcela de vida útil que o componente dispõe para o sistema. Tal prerrogativa diferencia-se de estudos anteriores (ANTUNES *et al.*, 2020a).

Em relação à manutenção, foram considerados os impactos do uso de combustível para aspiração, estimado em 5,28 toneladas durante toda a vida útil do sistema, e da operação do veículo, estimada em 960 horas durante toda a vida útil. Ambos os processos foram considerados conforme disponibilidade no *Ecoinvent*. A operação também levou em consideração o desgaste do veículo e o uso de óleo lubrificante para funcionamento. Outros impactos como gases emitidos também estão incorporados.

4.4.2.7 Albedo das diferentes superfícies

O aumento do albedo das estruturas leva à maior reflexão da radiação de onda curta incidente na terra. Tal aumento de reflexão pode ser observado como uma diminuição no calor absorvido e mantido dentro dos centros urbanos, o qual pode ser considerado equivalente ao processo de acúmulo de gases de efeito estufa e conse-

quente aumento de temperatura global. Yu e Qing Lu (2014), por exemplo, avaliaram alguns estudos na área de albedo de pavimentos e concluíram que para cada 0,01 de aumento no albedo gera-se uma compensação entre 2,55 e 4,90 kg de CO₂ por metro quadrado. Para o presente estudo, tal valor representaria entre 12,75 e 24,50 toneladas de CO₂ por mudança de albedo.

Os albedos considerados neste estudo contemplam os valores de 0,10 para as superfícies asfálticas, permeáveis ou impermeáveis, e 0,25 para as superfícies de concreto (BALBO, 2020). Sabe-se que o evento de evaporação da água nos poros do pavimento promove resfriamento, porém não foi encontrado método de quantificar esse valor em forma de compensação de CO₂. Com os valores de albedo e utilizando a Equação 17, obteve-se o valor de 184,81 toneladas de CO₂ equivalente em 20 anos de análise para a troca da superfície de asfalto para concreto. Ou seja, um benefício para os cenários Cc e Dc.

4.4.2.8 Carbonatação

O processo de carbonatação foi considerado conforme as conclusões de Ellingboe *et al.* (2019). Segundo o estudo, valores entre 8 e 12% do CO₂ emitido inicialmente por peças de concreto permeável pode ser recuperado por meio da carbonatação. Deste modo, foi calculada a emissão inicial de CO₂ dos blocos por meio do *OpenLCA* para a consequente compensação durante a fase de uso. A emissão inicial obtida foi de 60,61 toneladas de CO₂ equivalente para a construção do estacionamento com revestimento em blocos de concreto. Os demais componentes de concreto estão enterados e, dessa forma, foi admitida a não ocorrência da carbonatação, por insuficiência de CO₂ para a reação química. Desse modo, 6061 kg de CO₂ são compensados pela carbonatação das peças de revestimento. Utilizou-se o valor médio de 10%, obtido por Ellingboe *et al.* (2019).

4.4.2.9 Melhoria da qualidade da água

A melhoria da qualidade da água pluvial foi considerada por meio da quantificação da massa de poluente deixada de ser inserida no solo ou lençol freático. A Tabela 15 mostra os cenários, espessuras das camadas granulares, poluentes e parâmetros considerados para a quantificação dos poluentes.

Tabela 15 – Quantitativo da diminuição de poluentes pela filtração de pavimentos permeáveis.

Cenário	Espessura da camada granular (mm)	Poluente	Concentração inicial (mg/l)	Taxa de redução (%)	Massa de poluente evitada (kg)
Revestimento de concreto (Cc e Dc)	280	Fósforo total	2,5	50,0	215,7
		Nitrogênio total	1,5	2,3	6,0
		Zinco	0,5	49,1	42,4
Revestimento asfáltico (Ca e Da)	370	Fósforo total	2,5	57,6	248,7
		Nitrogênio total	1,5	2,7	7,0
		Zinco	0,5	49,1	42,4

4.4.2.10 Omissão de processos

A omissão dos processos que foram similares em todos os cenários também foi realizada. Desse modo, todos os componentes dos telhados (telhas, calhas, tubos verticais e demais sistemas) foram omitidos uma vez que foram equivalentes. Também foram omitidos os impactos do descarte dos componentes granulares e da manta impermeável na pavimentação. Tal consideração foi realizada uma vez que os componentes provavelmente não seriam retirados em uma eventual restauração do pavimento. O descarte de drenos, caixas de inspeção e galerias pluviais também foi omitido.

4.4.2.11 Processos utilizados no *OpenLCA*

Entre materiais iniciais, transporte, fase de uso, manutenção e descarte final, foram inseridos um total de 31 processos e quatro fluxos elementares. Cada processo possui sua rede de processos intermediários antecessores, conforme o banco de dados *Ecoinvent 3.8*, de modo a produzir o produto final. Desse modo, os cenários finais apresentaram aproximadamente 13.700 processos e 152.000 links. No Apêndice D são mostrados os processos escolhidos. Sempre que possível optou-se por processos brasileiros, com o restante baseado em processos *RoW - Rest of World*.

4.4.3 Avaliação do impacto ambiental

Com o inventário de dados finalizado, pode-se realizar a análise do impacto ambiental dos sistemas. Foram separadas as análises ao nível de *midpoint* e *endpoint* para melhor explorar os resultados.

4.4.3.1 Categorias *midpoint* - Análise geral

A Tabela 16 mostra os impactos finais obtidos ao nível de *midpoint* para os seis cenários avaliados. Os resultados foram então normalizados em relação ao maior valor entre eles em módulo (impacto positivo ou negativo máximo) e mostrados em forma

de percentual de impacto na Figura 53. Dessa forma, tem-se mais fácil visualização de quais categorias possuem maiores diferenças entre os cenários.

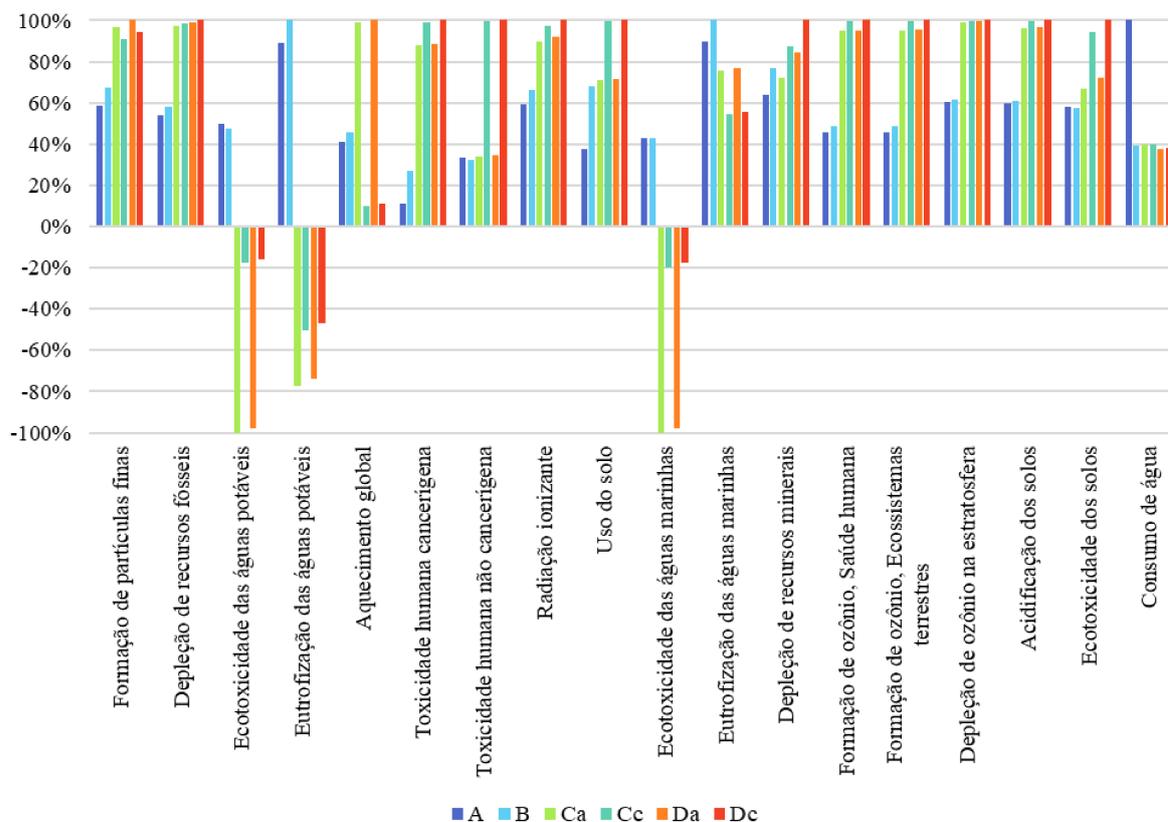
Tabela 16 – Impactos finais em categoria *midpoint* dos seis cenários avaliados.

Indicador	Cenário					
	A	B	Ca	Cc	Da	Dc
Formação de partículas finas	5,06E+01	5,85E+01	8,35E+01	7,88E+01	8,66E+01	8,19E+01
Depleção de recursos fósseis	2,28E+04	2,47E+04	4,14E+04	4,19E+04	4,20E+04	4,25E+04
Ecotoxicidade das águas potáveis	2,90E+03	2,74E+03	-5,80E+03	-1,03E+03	-5,69E+03	-9,21E+02
Eutrofização das águas potáveis	1,06E+01	1,18E+01	-9,17E+00	-5,97E+00	-8,77E+00	-5,56E+00
Aquecimento global	6,75E+04	7,54E+04	1,63E+05	1,62E+04	1,65E+05	1,80E+04
Toxicidade humana cancerígena	3,47E+01	8,22E+01	2,69E+02	3,04E+02	2,72E+02	3,07E+02
Toxicidade humana não cancerígena	2,34E+03	2,27E+03	2,39E+03	6,99E+03	2,42E+03	7,03E+03
Radiação ionizante	1,24E+03	1,39E+03	1,87E+03	2,03E+03	1,93E+03	2,09E+03
Uso do solo	4,44E+03	8,01E+03	8,38E+03	1,17E+04	8,40E+03	1,18E+04
Ecotoxicidade das águas marinhas	8,69E+02	8,63E+02	-2,02E+03	-4,01E+02	-1,98E+03	-3,57E+02
Eutrofização das águas marinhas	6,14E+00	6,86E+00	5,18E+00	3,74E+00	5,28E+00	3,84E+00
Depleção de recursos minerais	3,46E+02	4,16E+02	3,91E+02	4,74E+02	4,57E+02	5,42E+02
Formação de ozônio, Saúde humana	5,75E+02	6,10E+02	1,19E+03	1,25E+03	1,19E+03	1,25E+03
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	5,87E+02	6,23E+02	1,21E+03	1,27E+03	1,22E+03	1,28E+03
Depleção de ozônio na estratosfera	4,91E-02	4,97E-02	8,04E-02	8,07E-02	8,06E-02	8,09E-02
Acidificação dos solos	4,83E+02	4,92E+02	7,76E+02	8,04E+02	7,81E+02	8,09E+02
Ecotoxicidade dos solos	1,69E+05	1,68E+05	1,96E+05	2,76E+05	2,11E+05	2,92E+05
Consumo de água	4,64E+04	1,82E+04	1,84E+04	1,85E+04	1,74E+04	1,76E+04

Percebe-se pela Figura 53 que o cenário base apresentou impacto similar ao cenário B, captação de água pluvial por telhados, em quase todas as categorias. As maiores divergências ocorreram nas categorias de consumo de água, toxicidade humana cancerígena e uso do solo, com maior impacto do cenário B. Ou seja, percebe-se que há um equilíbrio sistêmico de maiores impactos nas demais categorias para obter os sistemas adicionais que diminuem o impacto da captação de água. Tal resultado é similar, em modo geral, com os resultados de Marinowski e Ghisi (2019).

O uso de pavimentos permeáveis por sua vez obteve resultados bastante diferentes de estudos anteriores (ANTUNES *et al.*, 2020a; BHATT *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020), uma vez que até o momento é o primeiro trabalho que apresenta a comparação *midpoint* com introdução dos três diferentes impactos da fase de uso. A introdução da fase de uso gerou redução de impactos principalmente nas categorias de: Ecotoxicidade das águas potáveis, Eutrofização das águas potáveis e Ecotoxicidade das águas marinhas. Para esses três indicadores, são observáveis impactos negativos, uma vez que há redução da poluição entregue em relação ao caso base. Tais resultados são similares aos de Bhatt *et al.* (2019), que também obtiveram redução nas categorias de ecotoxicidade e eutrofização. Adicionalmente, Bhatt *et al.* (2019) obtiveram redução de toxicidade humana não-cancerígena, não observável nesta pesquisa.

Figura 53 – Comparação dos indicadores de impacto *midpoint* entre os seis cenários.



Também é notável a redução de impacto nos cenários com revestimento de concreto no indicador "Aquecimento global", uma vez que os efeitos do aumento de albedo e da carbonatação geram benefícios. Conforme elencado no inventário, ambos os efeitos de fase de uso são responsáveis por praticamente zerar o impacto ambiental de "Aquecimento global", quando analisado comparativamente à alternativa asfáltica.

As Figuras 54 a 59 mostram os percentuais de impacto em cada uma das categorias, para melhor visualização dos impactos das diferentes fases em cada um dos cenários. De acordo com Antunes *et al.* (2020a), a fase inicial é de alto impacto para todas as categorias em estudos do tipo, seguido da fase de final de vida, operação e por fim manutenção. Tais resultados também foram observados por Bhatt *et al.* (2019), com maior impacto na fase de construção, seguida de fim de vida e manutenção, para a maior parte dos indicadores.

Nesta pesquisa obteve-se a mesma ordem de prioridade dos impactos para os cenários A e B, com a sequência de fase inicial, fim de vida, operação, manutenção e uso. Porém, diferentemente dos demais estudos, as fases de manutenção e uso obtiveram maior relevância em alguns dos cenários e indicadores. Maiores detalhamentos acerca destes impactos são explorados nas próximas seções.

Figura 54 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário base - A.

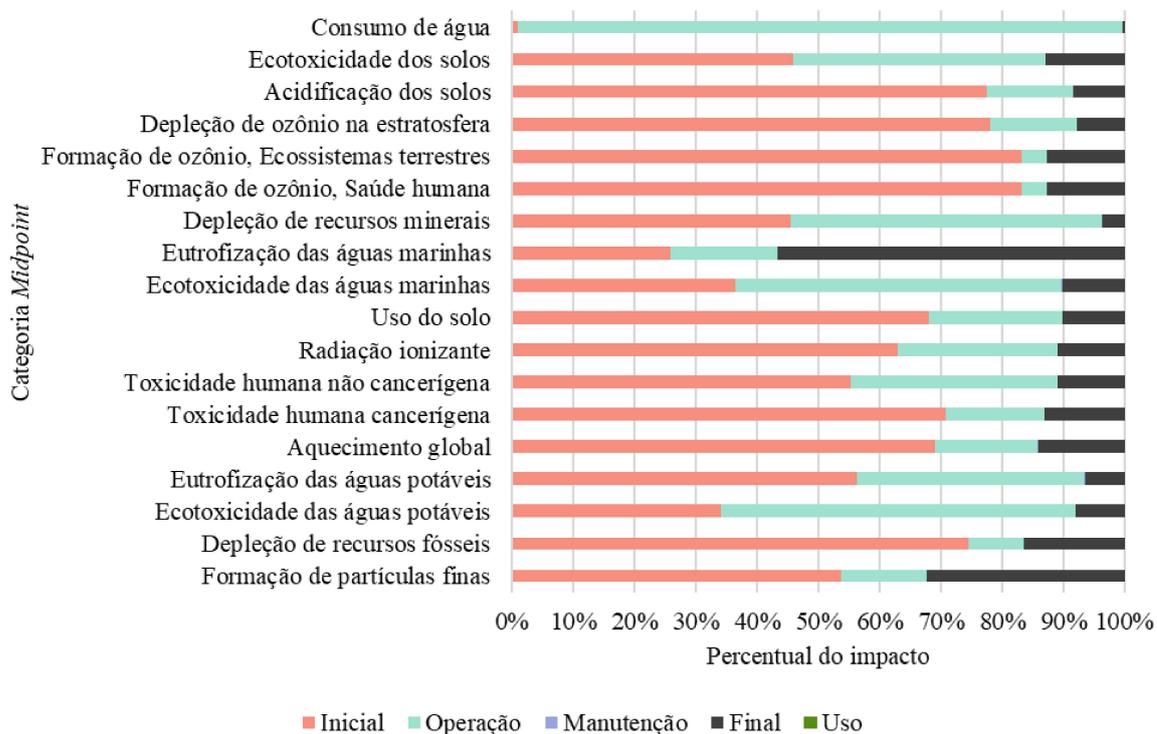


Figura 55 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo telhado - B.

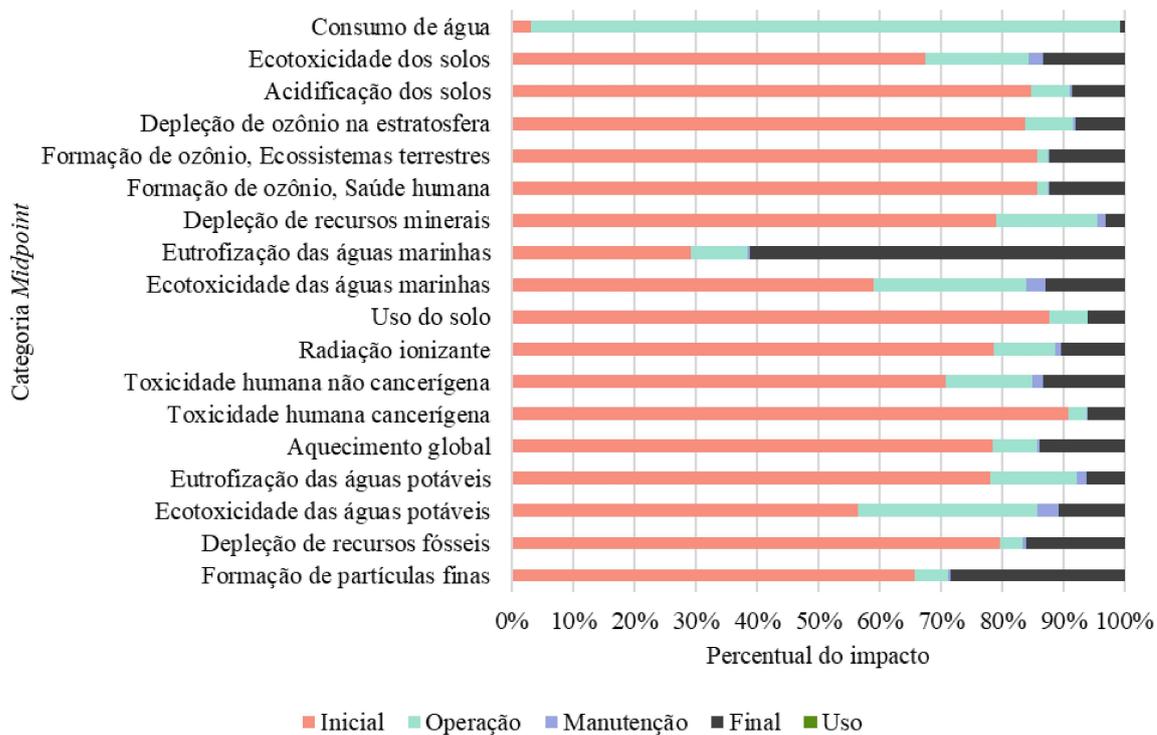


Figura 56 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento asfáltico permeável - Ca.

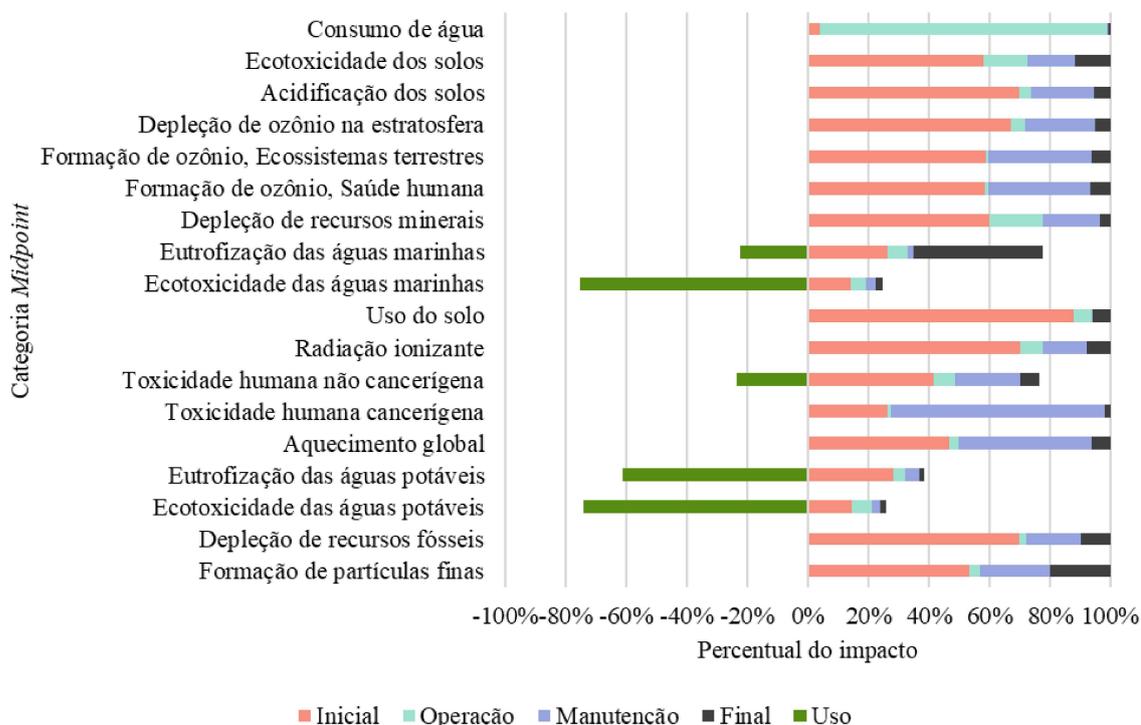


Figura 57 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento de concreto permeável - Cc.

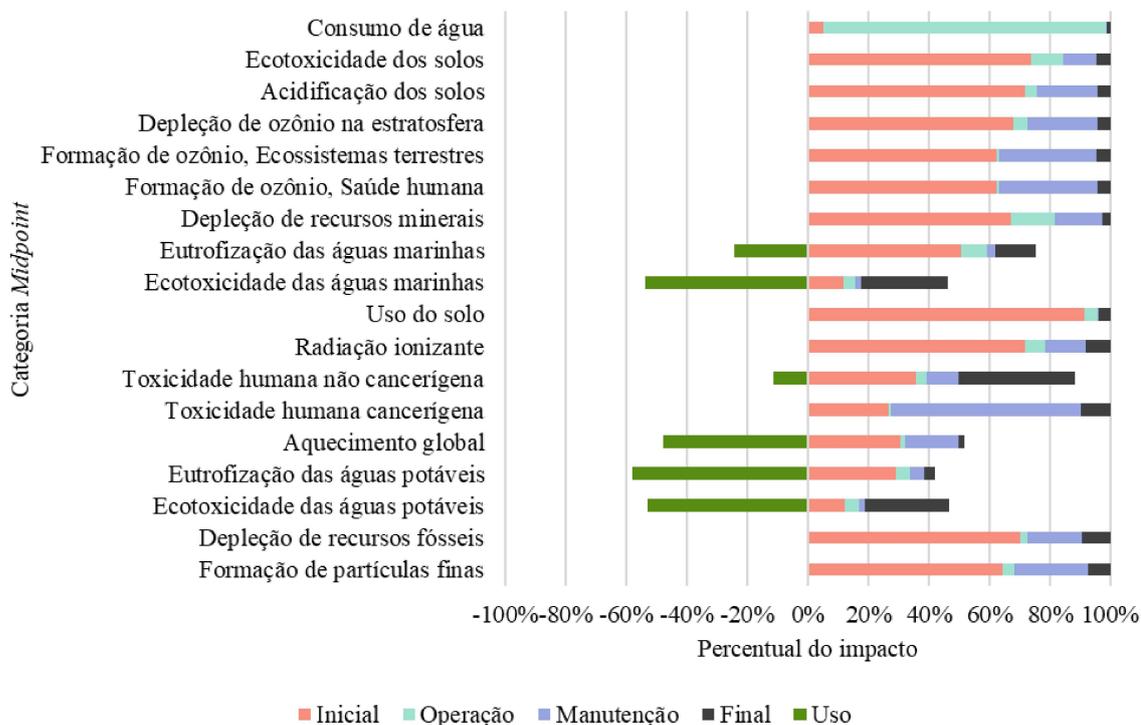


Figura 58 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento asfáltico permeável e pelo telhado - Da.

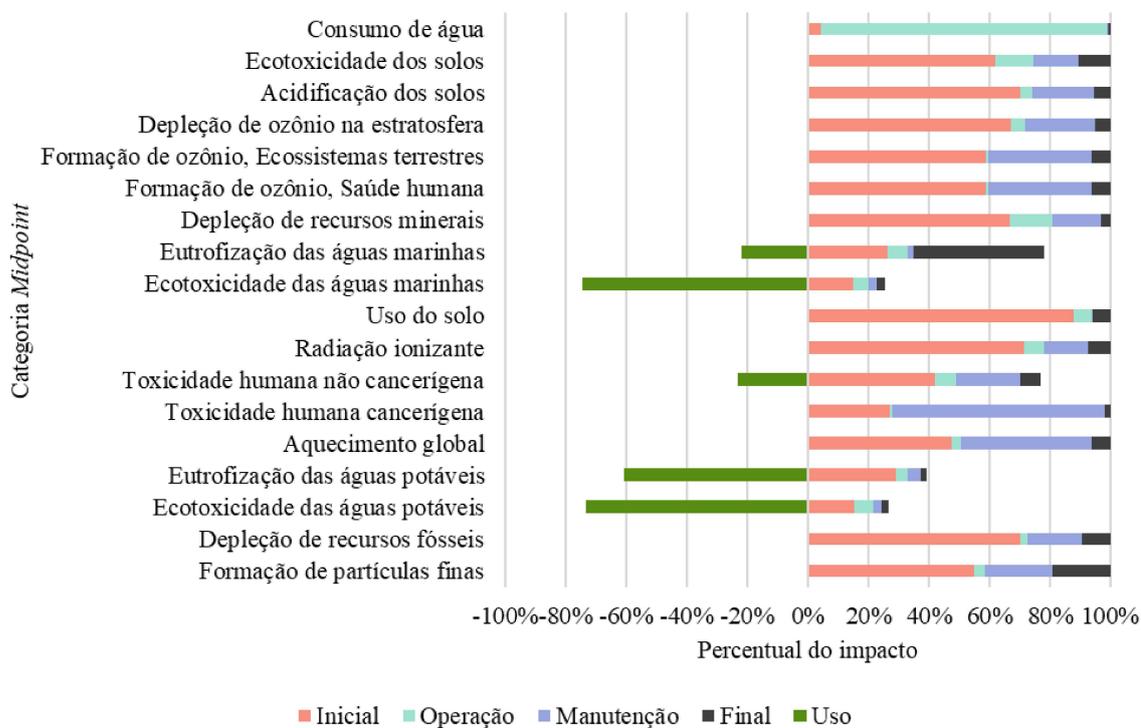
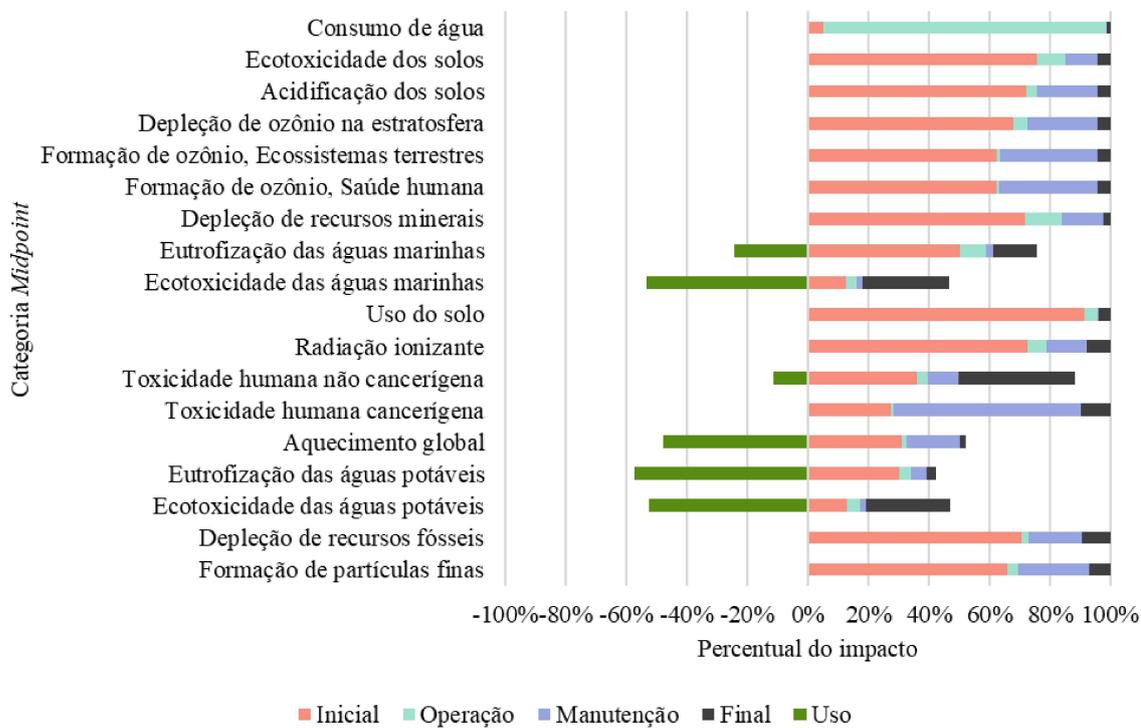


Figura 59 – Percentual de impacto de cada fase para o cenário de captação pelo pavimento de concreto permeável e pelo telhado - Dc.



Os resultados demonstram a necessidade de incorporação dos benefícios de pavimentos permeáveis dentro dos escopos da ACV, uma vez que os indicadores demonstram relevância numérica do impacto. Ou seja, a consideração da melhoria da qualidade da água é tão importante quanto a correta modelagem das demais fases para os indicadores de eutrofização, ecotoxicidade, toxicidade não-cancerígena e aquecimento global. A não consideração pode levar a interpretações errôneas dos reais impactos produzidos pelos diversos sistemas. Também se ressalta que outros benefícios dos pavimentos permeáveis, como a redução de ruídos provocados por veículos e os impactos térmicos nos edifícios adjacentes, não foram modelados, os quais podem enaltecer mais as diferenças de resultados.

A Figura 54 mostra os percentuais das fases do cenário base, na qual percebe-se haver maior predominância de impacto da fase inicial, seguida da fase de fim de vida e operação. A fase de uso não possui nenhum impacto ou benefício ambiental, e a fase de manutenção responde por resultados de ordem muito inferior às demais fases. Para os demais cenários a fase de operação apresenta menor impacto, uma vez que a quantidade demandada de tratamento de água é inferior.

Outro ponto de importante reflexão é sobre a rotina de manutenção dos cenários Ca, Cc, Da e Dc. Foram contabilizadas 960 horas de uso de máquina de sucção e restauração de permeabilidade, a qual gerou impactos significativos, conforme mostrado nas Figuras 56 a 59. Em categorias de impacto como toxicidade cancerígena, a manutenção foi responsável pela maior parcela, creditada às emissões dos equipamentos e impactos secundários do uso das máquinas, com óleo lubrificante e derivados. Em contrapartida, nos cenários base e de captação pelo telhado, A e B, o impacto creditado à manutenção foi muito inferior às demais fases.

Para os cenários A e B, também se percebe grande impacto da fase de fim de vida para as categorias de eutrofização das águas marinhas e da formação de partículas finas. Para a eutrofização das águas marinhas, o processo "*treatment of waste asphalt*" para disposição em aterro sanitário é responsável por grande parte do impacto, com correspondência aos produtos liberados durante a estabilização e descarte do material. Para a formação de partículas finas, o processo "*treatment of waste concrete gravel*" é responsável por grande parte do impacto. Novamente, a escolha pelo tipo de descarte final é totalmente dependente na realidade tecnológica de reciclagem, e foi definida dentro do escopo da pesquisa e da realidade da cidade estudada.

Para facilitar a discussão dos resultados e apresentação, nas próximas seções são apresentados os indicadores *midpoint* e *endpoint* de comparações dois a dois entre os cenários simulados. Dessa forma pretende-se poder melhor debater as influências na interpretação e em possíveis conclusões sobre os sistemas. Por fim, é apresentada também a comparação entre todos os cenários na categoria *endpoint*. De

acordo com Antunes *et al.* (2020a), a normalização e ponderação final (agrupamento) realizada na categoria *endpoint* facilita a discussão de um indicador único, capaz de dar maior poder de decisão a quem interpreta os resultados.

A discussão em nível de *Endpoint* foi realizada com os fatores de normalização e ponderação publicados indicados diretamente no pacote de método AICV. Tais fatores, incorporados no *OpenLCA*, servem para equiparar os impactos em um só esquema de pontuação. Desse modo, um indicador como "consumo de água - m³" é transformado primeiramente para DALY (*Disability Adjusted Life Years*, em inglês) e posteriormente para pontos. A somatória dos pontos resulta em um indicativo do impacto global, dada a significância estipulada para as diferentes categorias.

Foram discutidos os seguintes pares de cenários:

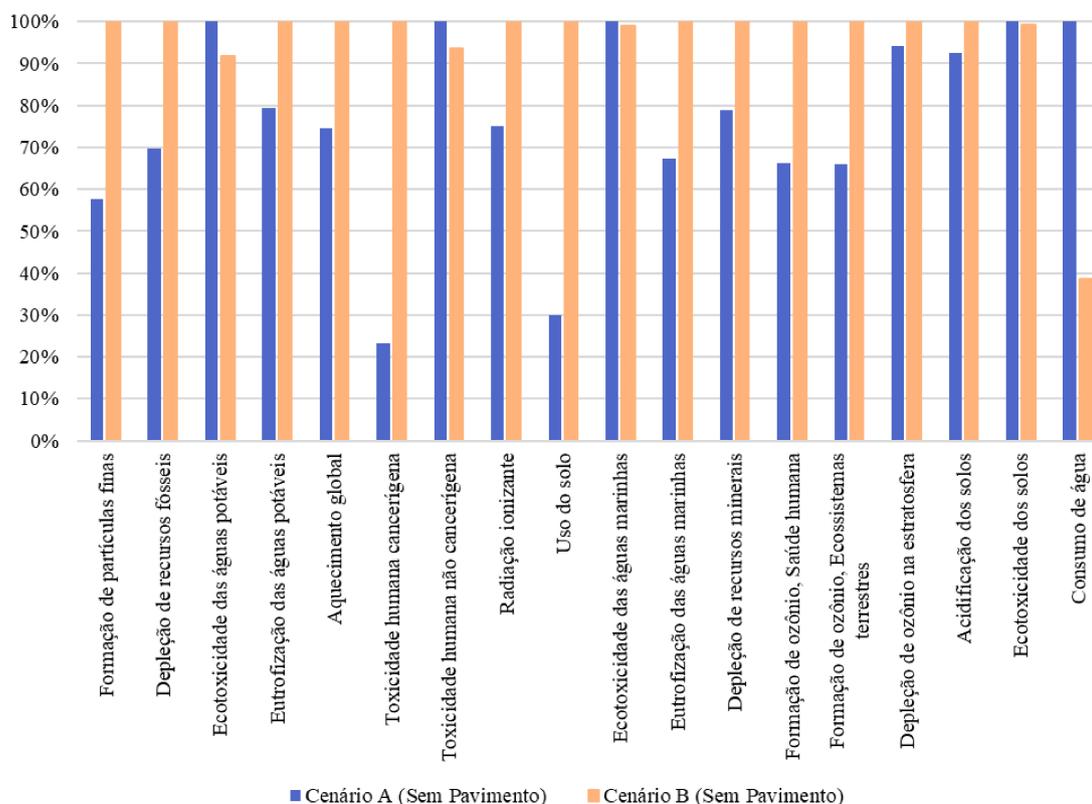
- Cenário base e captação por telhados (A e B);
- Cenário base e captação por pavimento permeável asfáltico (A e Ca);
- Captação por telhados e captação por pavimento permeável asfáltico (B e Ca);
- Captação por pavimento permeável asfáltico somente e por pavimento somado de telhado (Ca e Da);
- Captação por pavimentos permeáveis de asfalto e de concreto (Ca e Cc).

4.4.3.2 Comparação entre os cenários com pavimento convencional (A e B)

Conforme observado, para os cenários A e B, base e captação por telhado respectivamente, os impactos em quase todas as categorias foram de mesma ordem, com exceção das categorias de consumo de água, toxicidade humana cancerígena e uso do solo. Para a comparação somente de ambos os sistemas, pode-se retirar os inventários do pavimento impermeável, uma vez que são idênticos. Dessa forma, a Figura 60 mostra os resultados de ambos os sistemas com exclusão do pavimento. É válido ressaltar que o inventário de drenagem apresenta diferenças, conforme os traçados para extravasão da captação do telhado ou simples condução das águas pluviais. Essas diferenças tornam-se mais notáveis nos resultados finais.

Percebe-se que em doze dos dezoito indicadores o cenário B apresentou maior impacto. Tal resultado é definido pelos materiais adicionais necessários para o funcionamento do sistema. Por exemplo, na categoria de toxicidade humana cancerígena, o reservatório inferior de água pluvial é responsável por aproximadamente 77% do impacto, principalmente condicionado ao processo de produção da madeira para forma de construção. O processo também é responsável pela ampla diferença na categoria de uso do solo, com extração de madeira para confecção das peças. Outros processos como a produção de concreto e de aço estrutural são responsáveis por grande parte dos impactos ambientais que mais influenciam nesses doze indicadores.

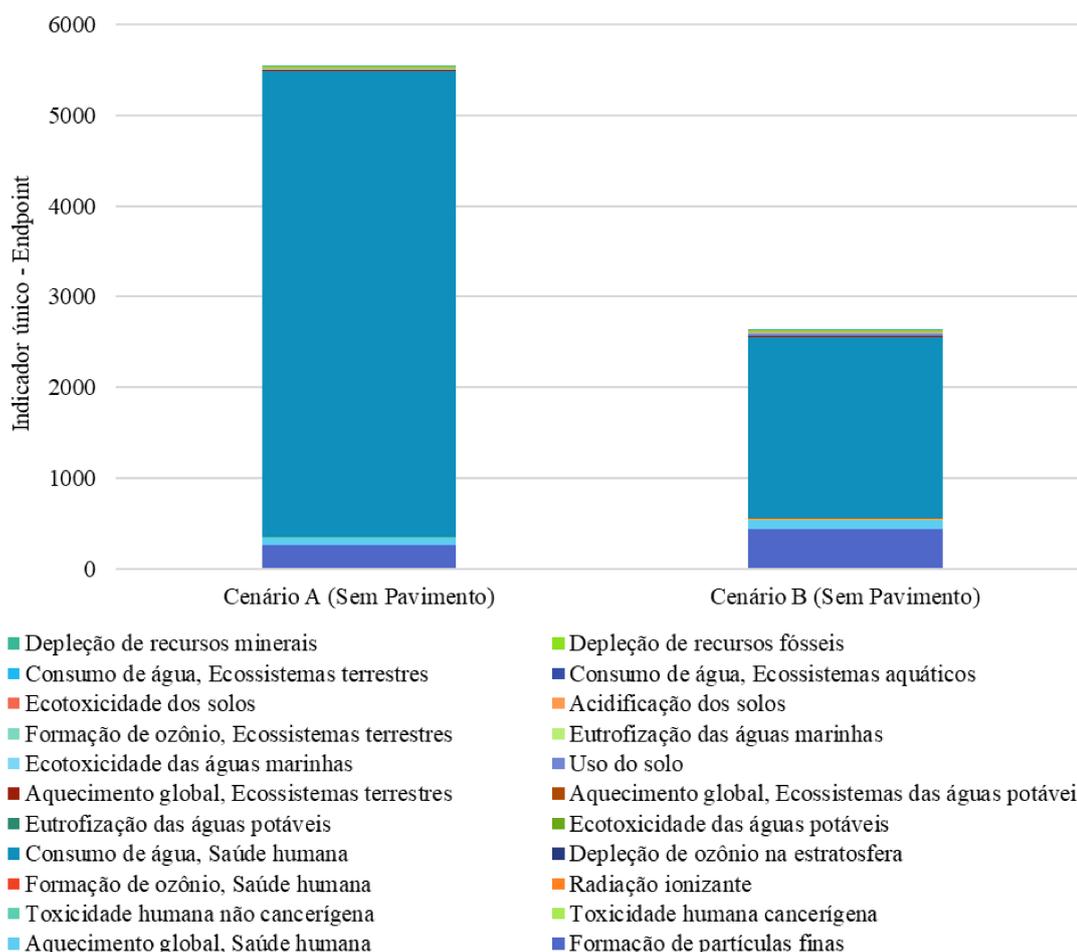
Figura 60 – Percentual de impacto *midpoint* comparativo entre os cenários A e B, sem o inventário dos pavimentos.



Para os seis indicadores que o cenário A obteve maior impacto, o principal processo elencado é a entrega de água potável, seguida dos materiais necessários para produção das bocas de lobo e galerias de drenagem, como concreto, tijolos cerâmicos e brita. De toda forma, em grande parte desses indicadores, a diferença entre o cenário com e sem captação é de pequena ordem, não ultrapassando os 10%. Somente para o indicador de consumo de água que essa diferença torna-se notória, com mais de 60% de variação.

Por fim, a Figura 61 mostra a comparação entre ambos os sistemas, A e B sem pavimento, através do indicador *endpoint* do *ReCiPe 2016*, após agrupamento. Percebe-se que os resultados apontam para a compensação final dos impactos ambientais em favor do sistema de captação de água pluvial. Ou seja, por mais que em grande parte dos indicadores haja maior impacto no sistema de captação de água pluvial, a disponibilização final de água alternativa e diminuição da captação dos estoques naturais torna benéfico o sistema. Entre demais indicadores agregados que também pontuam a favor do sistema alternativo estão alguns de ecotoxicidade e toxicidade.

Figura 61 – Comparação de pontuação única (*endpoint*) dos cenários A e B, sem o inventário dos pavimentos.



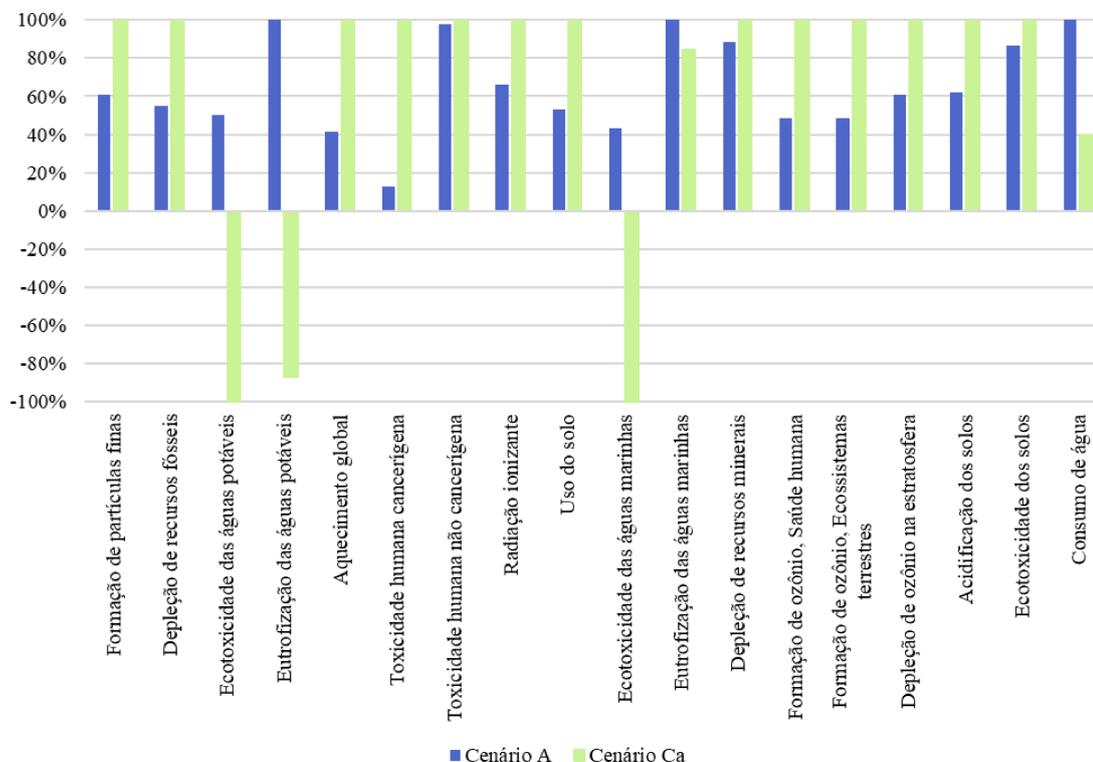
4.4.3.3 Comparação entre os cenários base e de pavimentação permeável (Ca e A)

A segunda comparação realizada é similar ao estudo de Antunes *et al.* (2020a). O objetivo é comparar o uso de pavimentação permeável com o caso base, de modo a compreender se o sistema de captação é capaz de gerar benefícios durante o ciclo de vida. Foi comparada nesta seção somente a alternativa com revestimento asfáltico, de modo a poder discutir os resultados com os de Antunes *et al.* (2020a) e verificar a influência da adição de componentes em relação à estrutura proposta pelos autores.

A Figura 62 mostra a comparação *midpoint* de ambos os cenários, A e Ca, com valor percentual máximo para o maior impacto. Para esta comparação foram mantidos todos os componentes do pavimento, uma vez que não existe a possibilidade de omissão de processos iguais. Percebe-se que, diferentemente de Antunes *et al.* (2020a), os resultados apresentados demonstram impacto mais significativo do sistema alternativo, com somente quatro indicadores nos quais o cenário base foi mais impactante. O resultado já era esperado, uma vez que foram incluídos novos componentes, principalmente de drenagem, para o sistema alternativo. Para as categorias de ecotoxicidade e

eutrofização com carga negativa, tem-se como responsáveis os benefícios do sistema de filtração pelo pavimento.

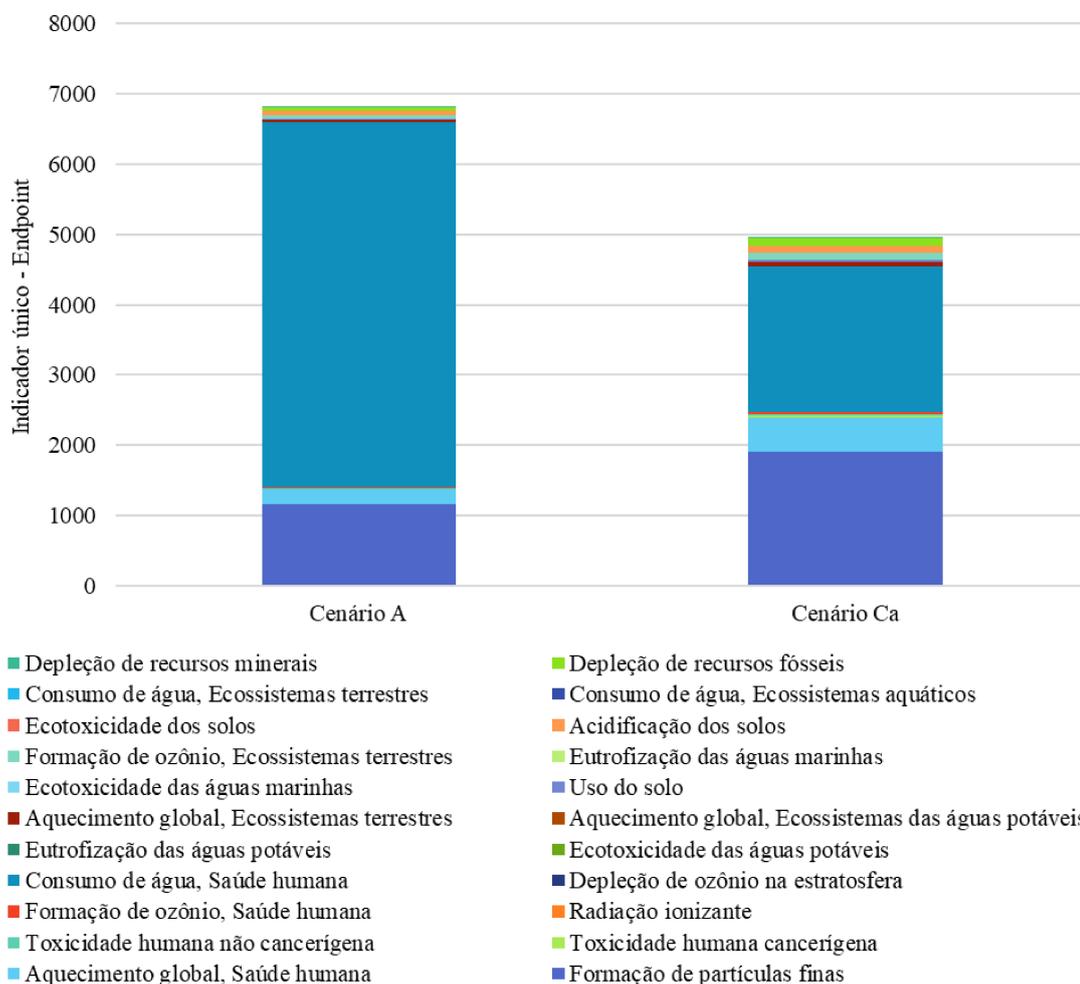
Figura 62 – Percentual de impacto *midpoint* comparativo entre os cenários A e Ca.



Em relação à pontuação final, foi realizada a normalização e ponderação dos resultados. A Figura 63 mostra os resultados de comparação entre os cenários A e Ca. Percebe-se resultado similar ao da Figura 60, com compensação ambiental pelo reduzido volume de água potável necessário no sistema alternativo. Reitera-se que o sistema, similarmente ao de Antunes *et al.* (2020a), possui potencial para otimização com diferentes modelos de arranjo de drenagem, novos materiais incorporados, entre demais possibilidades. Ou seja, o exemplo aqui mostrado serve como modelo norteador para potenciais usos sustentáveis de pavimentação permeável.

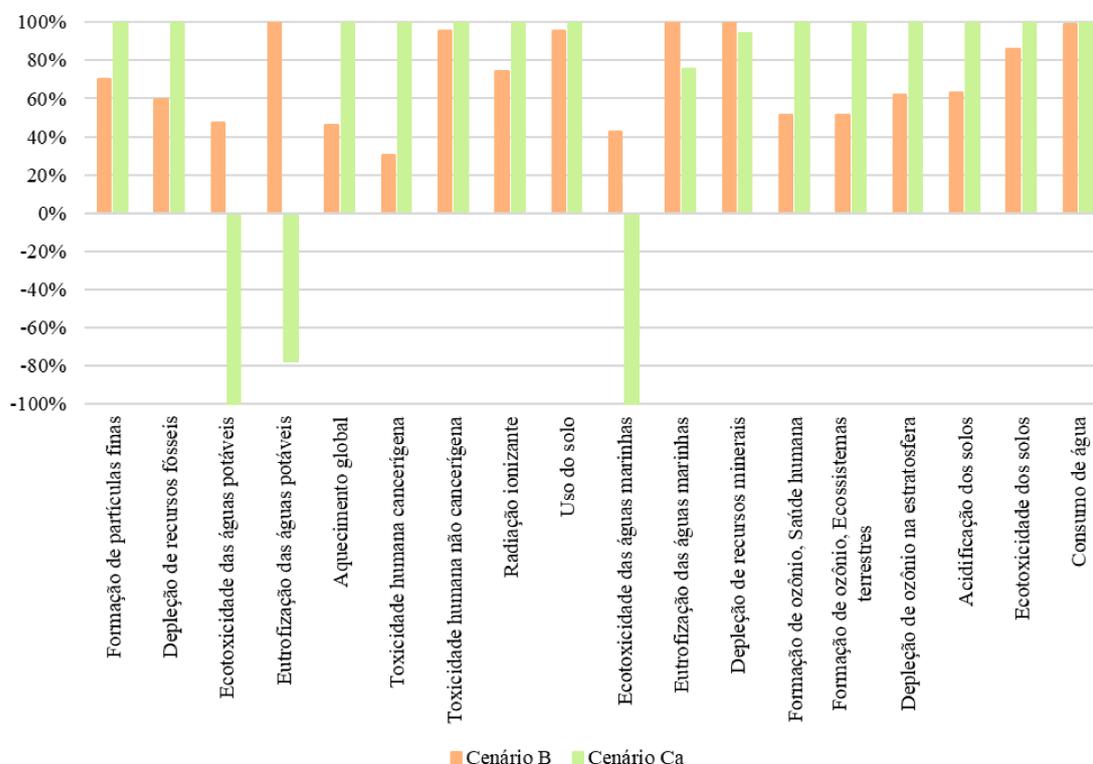
Outro ponto necessário de ser comentado é a escala dos resultados agrupados. Percebe-se que as categorias de formação de partículas finas e consumo de água, saúde humana, são as de principal relevância para a pontuação final. Em diferentes fatores para agrupamento, os resultados poderiam distinguir e modificar a tomada de decisão. Ou seja, reitera-se que a classificação e resultados aqui apresentados possuem referência ao método de agrupamento proposto. Maiores discussões acerca das incertezas e da análise de sensibilidade são realizadas na seção 4.4.7.

Figura 63 – Comparação de pontuação única (*endpoint*) dos cenários A e Ca.



4.4.3.4 Comparação entre os cenários de diferente superfície de captação (Ca e B)

Ambos os cenários Ca e B apresentaram comparações similares em relação ao caso base, com maiores impactos *midpoint* e menor pontuação final *endpoint*. Desse modo, objetivou-se comparar ambos para compreender qual estratégia é menos impactante ao meio ambiente. As simulações do potencial de economia de água potável geraram resultados similares, uma vez que a área de captação é a mesma e o coeficiente de escoamento superficial também é igual. Todavia, os demais componentes e benefícios da fase de uso são diferentes entre ambos os cenários, modificando os resultados da ACV. A Figura 64 mostra a comparação *midpoint* de ambos os cenários, B e Ca, com valor percentual máximo para o maior impacto.

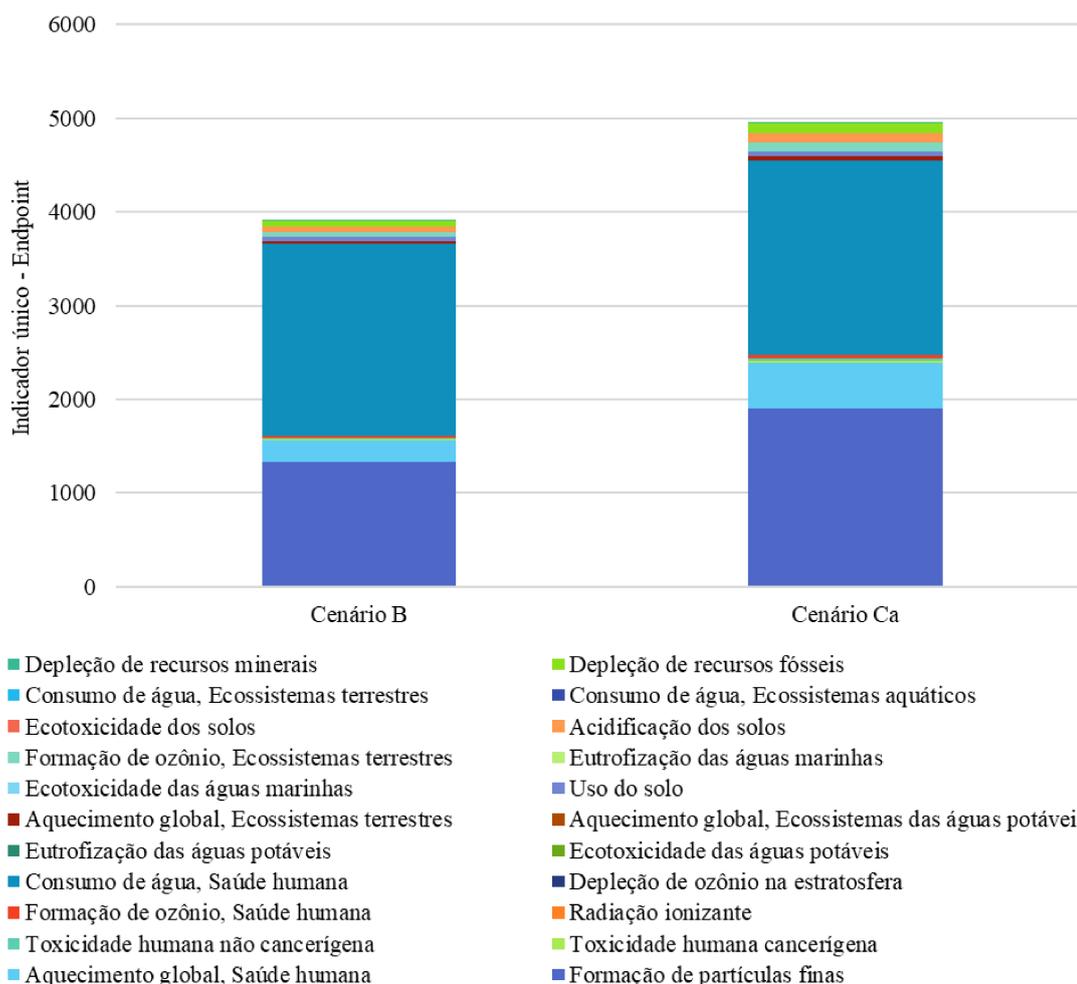
Figura 64 – Percentual de impacto *midpoint* comparativo entre os cenários B e Ca.

Dentre os impactos obtidos, cinco indicadores apresentaram maior impacto para o cenário B, enquanto doze apresentaram para o cenário Ca e a categoria consumo de água apresentou empate. Os cinco indicadores com maior impacto no sistema de captação por telhados foram: ecotoxicidade e eutrofização de águas marinhas, ecotoxicidade e eutrofização de águas potáveis, e depleção de recursos minerais. Para as categorias de ecotoxicidade e eutrofização das águas, a fase de uso do cenário Ca foi responsável pela compensação ambiental, através da diminuição de poluentes liberados. Para a categoria de depleção de recursos minerais, os materiais necessários para a drenagem do cenário B foram responsáveis pela diferença. Para todas as demais categorias, componentes adicionais para os pavimentos permeáveis como a manta PEAD, drenos corrugados, maquinário para reabilitação da permeabilidade e também espessura adicional de britas na *reservoir course* e *choker course*, foram responsáveis pelo maior impacto ambiental.

Desse modo, pode-se realizar a comparação com pontuação única de modo a verificar se as diferenças obtidas nas doze categorias representam pontuação suficiente para justificar a adoção do pavimento permeável asfáltico. A Figura 65 mostra o resultado da comparação em pontuação única dos cenários B e Ca. Percebe-se haver um impacto adicional para a composição do sistema de captação por pavimentos permeáveis, que não é compensado pelos benefícios da fase de uso. Reitera-se que alguns benefícios não foram incorporados, como valor estético, amortecimento da vazão

de pico, diminuição de ruídos, entre outros. Porém, dentro do escopo da pesquisa, a captação por meio de telhados mostrou-se menos impactante, com aproximadamente 80% dos impactos totais do sistema com pavimentos permeáveis.

Figura 65 – Comparação de pontuação única (*endpoint*) dos cenários B e Ca.



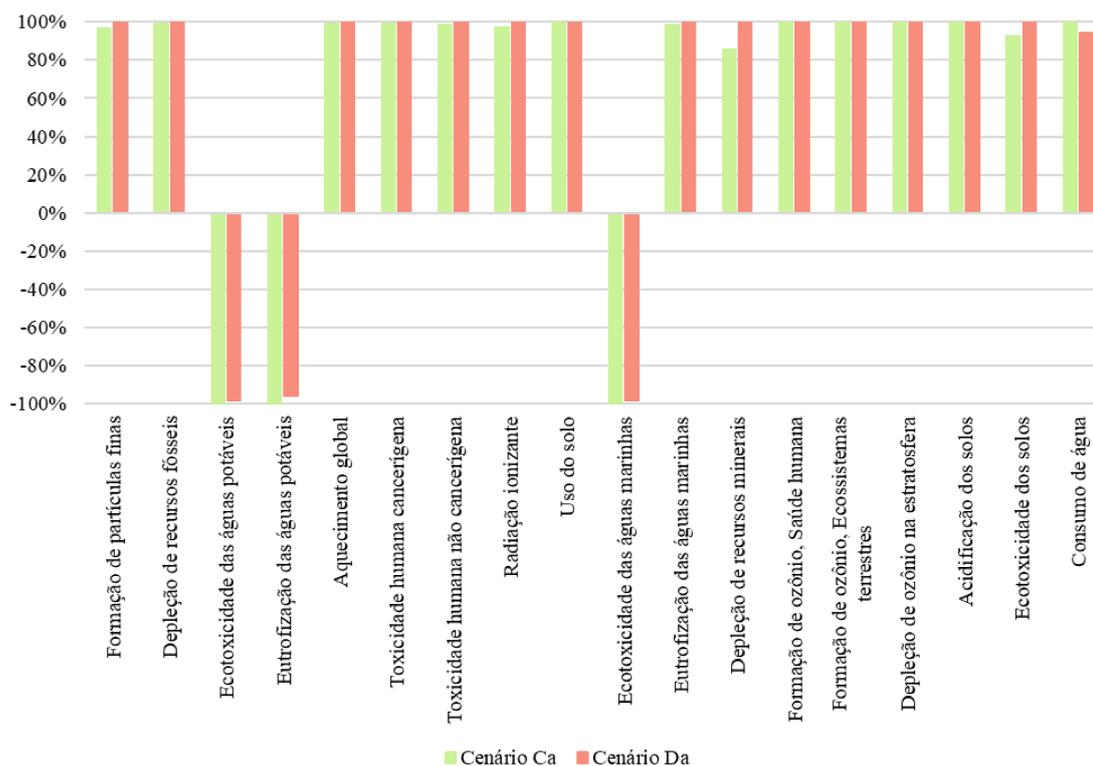
4.4.3.5 Comparação entre captação parcial e completa (Ca e Da)

Faz-se interessante também comparar os cenários de captação somente por pavimentos (Ca) e por pavimentos somados de telhados (Da). Esse acréscimo de área de captação não está diretamente relacionado a um aumento no volume hídrico disponibilizado, uma vez que o consumo e percentual de usos não potáveis denotam limite físico ao sistema. Ou seja, mesmo que mais água seja captada, não existe uma relação linear com a economia de água potável do sistema, conforme sustentado nas simulações da seção 4.3.

A Figura 66 mostra a comparação de resultados *midpoint* de ambos os cenários Ca e Da, com normalização em relação ao maior impacto por categoria. Diferentemente das demais comparações, para ambos os cenários os impactos foram muito

similares, com a maior diferença na depleção de recursos minerais com aproximadamente 17% de acréscimo para o cenário Da. Essa diferença para a depleção de recursos minerais está presente no aumento de materiais para a captação da água de telhados. Outras diferenças nos sistemas de drenagem e extravasão configuram as demais modificações nos resultados.

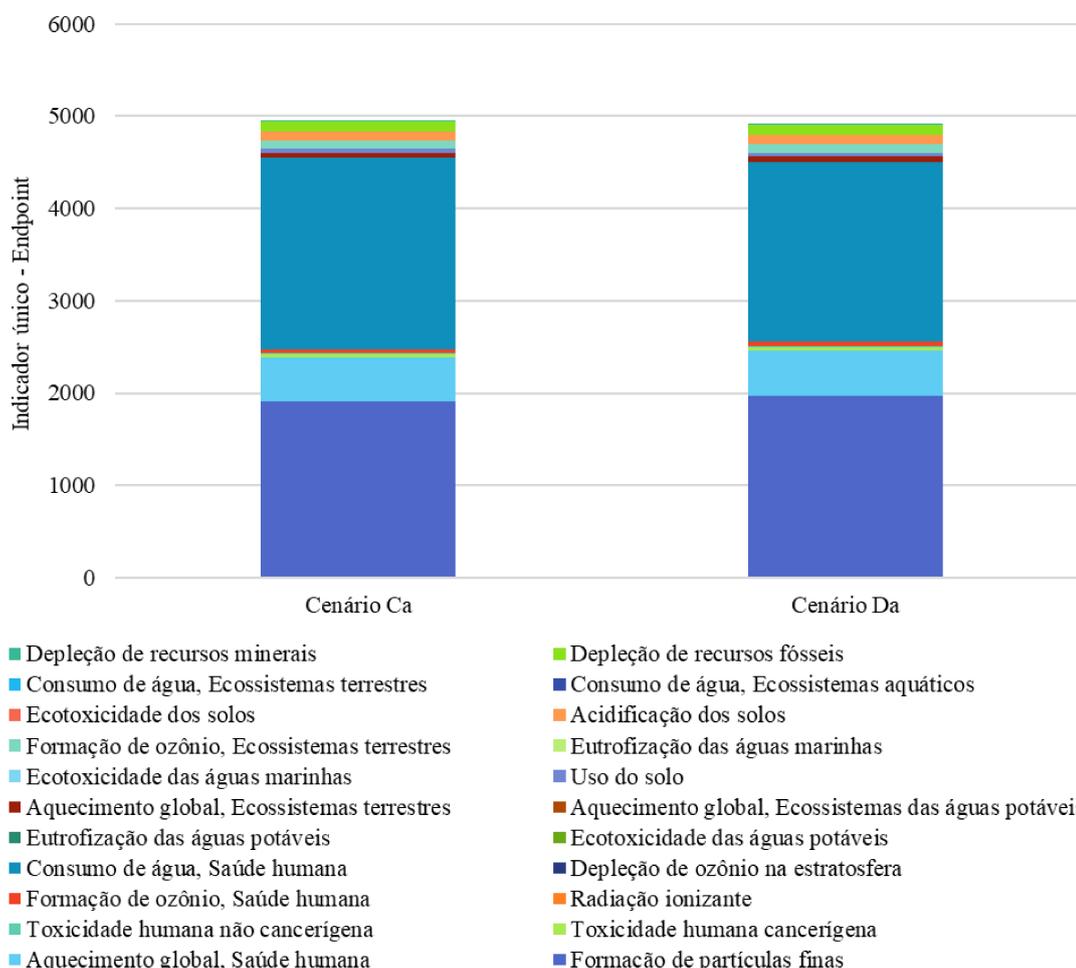
Figura 66 – Percentual de impacto *midpoint* comparativo entre os cenários Ca e Da.



A Figura 67 mostra a comparação em pontuação única para ambos os sistemas. Percebe-se que apesar de necessitar, de modo geral, de mais materiais para a captação por telhados, o leve aumento no potencial de economia de água potável gerou benefícios ambientais finais. Ou seja, a pouca água que é economizada a mais pelo uso de ambas as áreas de captação é capaz de compensar os impactos dos materiais adicionais. Para essa configuração final de sistema também reitera-se o potencial de utilizar reservatórios ainda maiores gerando mais economia.

Ou seja, para a configuração proposta de sistema de captação com 45.000 litros de reservatório inferior e demandas não potáveis pré-estabelecidas, o sistema com captação por telhados e pavimentos obteve impacto similar ao de captação somente por pavimentos. A diferença encontrada é muito pequena (menor que 1%), de modo que seria interessante o projetista avaliar outros parâmetros para validar a tomada de decisão, como custos e logística para funcionamento. De qualquer forma, é um resultado interessante pois indica equivalência ambiental de ambos os cenários.

Figura 67 – Comparação de pontuação única (*endpoint*) dos cenários Ca e Da.



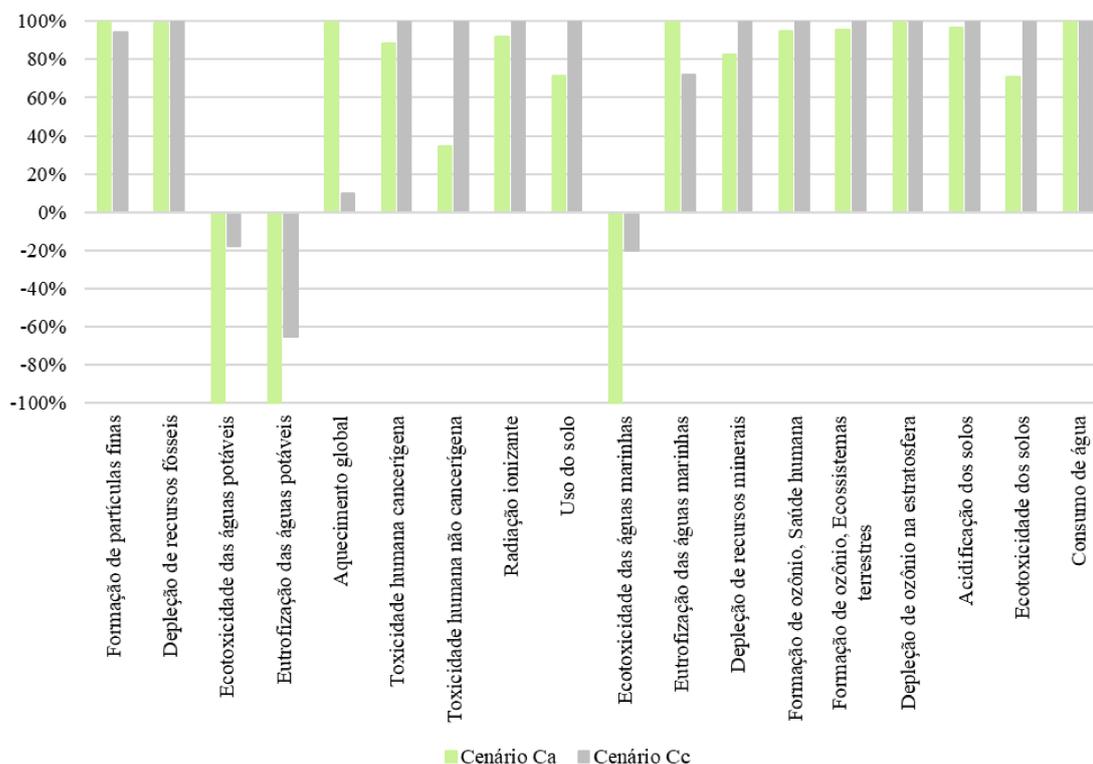
4.4.3.6 Comparação entre os tipos de revestimentos permeáveis (Ca e Cc)

Por fim, foram comparados os sistemas de captação por pavimentos permeáveis com dois tipos de revestimentos - asfáltico e de concreto. A opção por comparar ambos os cenários inicia da prerrogativa que atualmente ambos os componentes são possíveis em sistemas de pavimentação e, até o momento da pesquisa, nenhum autor comparou com o nível de detalhamento do ciclo de vida aqui proposto. Desse modo, projetistas atuais raramente indicam o componente para pavimentos permeáveis com consciência dos impactos ambientais no ciclo de vida, bem como as diferenciações dos benefícios.

A Figura 68 mostra a comparação *midpoint* dos cenários Ca e Cc. Percebe-se que em muitos dos indicadores a comparação apresentou impactos ambientais similares (80% ou mais de equivalência), com exceção das categorias de ecotoxicidade, toxicidade não-cancerígena, eutrofização, aquecimento global e uso do solo. Para estas categorias, houve diferença significativa do impacto de acordo com o revestimento adotado. O revestimento asfáltico apresentou menor impacto (ou maior compensação

ambiental) nas categorias de ecotoxicidade, eutrofização das águas potáveis, toxicidade humana não-cancerígena e uso do solo. O revestimento de cimento Portland apresentou menor impacto nas categorias de aquecimento global e eutrofização das águas marinhas.

Figura 68 – Percentual de impacto *midpoint* comparativo entre os cenários Ca e Cc.



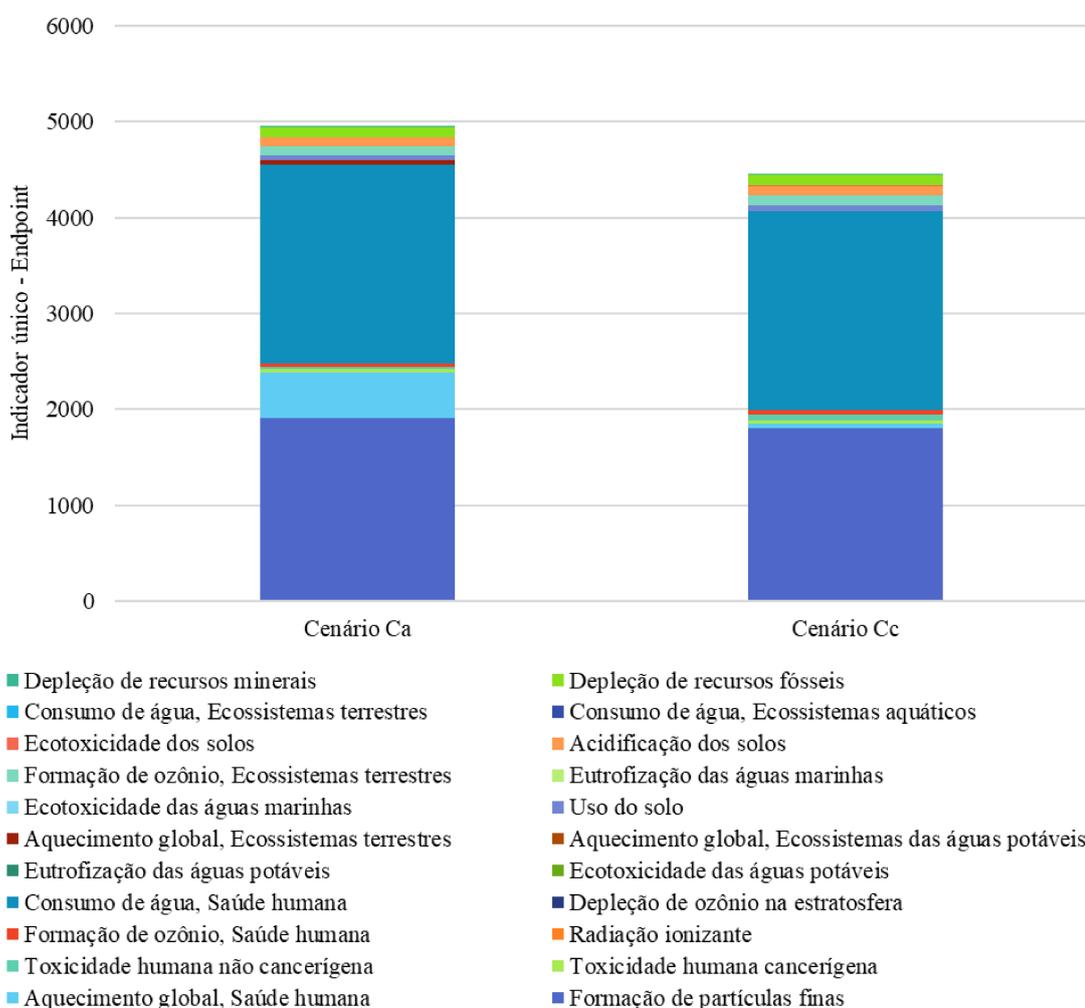
Para o indicador de aquecimento global, a principal diferença está na fase de uso, na qual o revestimento de concreto apresenta diminuição do impacto devido aos efeitos de aumento de albedo da estrutura e de carbonatação. Se não fosse a adição da fase de uso, o pavimento de concreto permeável apresentaria valores superiores aos de asfalto, o que demonstra a necessidade de avaliar e incluir os benefícios do uso em ACVs. O impacto final do cenário Ca para aquecimento global foi de 164.856 kg CO₂ eq., enquanto para o Cc foi de somente 18.067 kg CO₂ eq. Porém, se retirados os benefícios da fase de uso, o pavimento de Cc geraria 208.938 kg CO₂ eq.

Em relação à categoria de eutrofização de águas marinhas, as diferenças encontradas ocorreram nos processos relacionados ao asfalto. Na fase de construção o pavimento de concreto apresenta maiores impactos, porém a fase de tratamento dos componentes asfálticos foi bastante superior a de tratamento dos componentes cimentícios, superando os impactos da construção. Vale ressaltar que a fase de uso também apresentou diferença entre ambos os pavimentos, uma vez que o pavimento asfáltico apresenta maiores taxas de redução de poluente por apresentar maiores espessuras granulares. Tal compensação, todavia, não foi suficiente para obter resul-

tados menos impactantes no cenário com pavimento asfáltico para a eutrofização de águas marinhas.

A Figura 69 mostra o resultado *endpoint* para a comparação entre os cenários Ca e Cc. Percebe-se que o pavimento asfáltico produziu os maiores impactos ambientais potenciais. O cenário Cc apresentou aproximadamente 500 pontos a menos que o cenário Ca, representando uma redução de 10% da pontuação final. Todavia, essa diferença também está atribuída ao modelo de normalização e ponderação, apresentando incertezas em relação à comparação final. Tal diferença não é suficiente para justificar, em meio às incertezas do modelo, a adoção de um ou outro revestimento. Porém, serve como auxílio na tomada de decisão e demonstra similaridade nos impactos ambientais finais.

Figura 69 – Comparação de pontuação única (*endpoint*) dos cenários Ca e Cc.



A categoria aquecimento global, saúde humana, foi responsável pela maior diferença na pontuação de indicador único entre os cenários. Outras mudanças como o aquecimento global, ecossistemas terrestres, e a formação de partículas finas também influenciaram na comparação. Vale ressaltar que outros escopos de ACV podem

fornecer modificações nesta pontuação, como a incorporação de mais parâmetros na melhoria da qualidade da água, a análise de microclima do pavimento, efeitos de ruídos, entre outros.

4.4.3.7 Categorias *endpoint* - Análise geral

Após discutir dois a dois os cenários e elencar os principais processos responsáveis pelas diferenças entre os resultados, faz-se necessária uma última comparação entre todos os cenários. Para tal optou-se por mostrar os resultados *endpoint*, pois, conforme citado anteriormente, denota mais fácil visualização e auxilia na tomada de decisão. Foram separados dois gráficos para melhor visualização. A Figura 70 mostra os percentuais de cada cenário em relação à pontuação máxima de cada unidade. A Figura 71 mostra a comparação de pontuação única final separada nas três diferentes unidades (recursos, saúde humana e ecossistemas).

Figura 70 – Comparação de pontuação única (*endpoint*) normalizada em relação ao valor máximo da categoria, nos seis cenários.

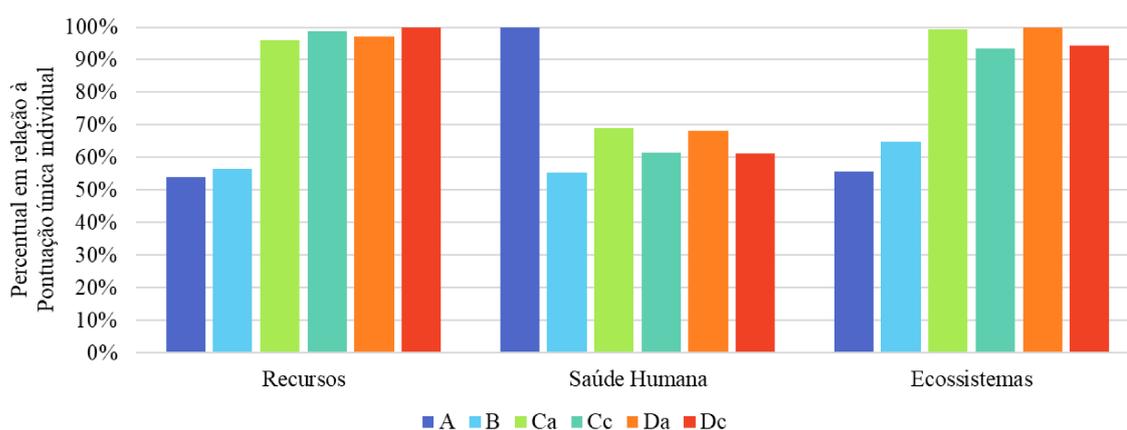
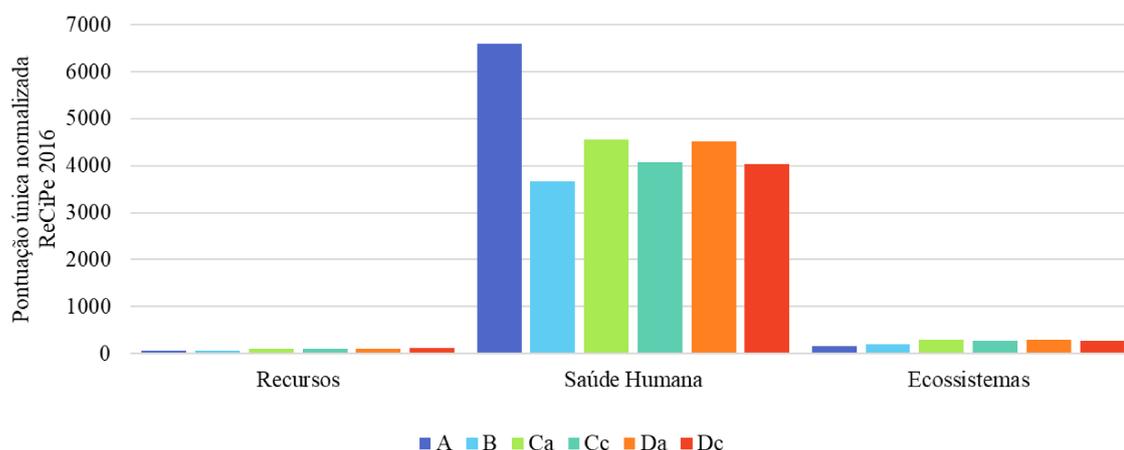


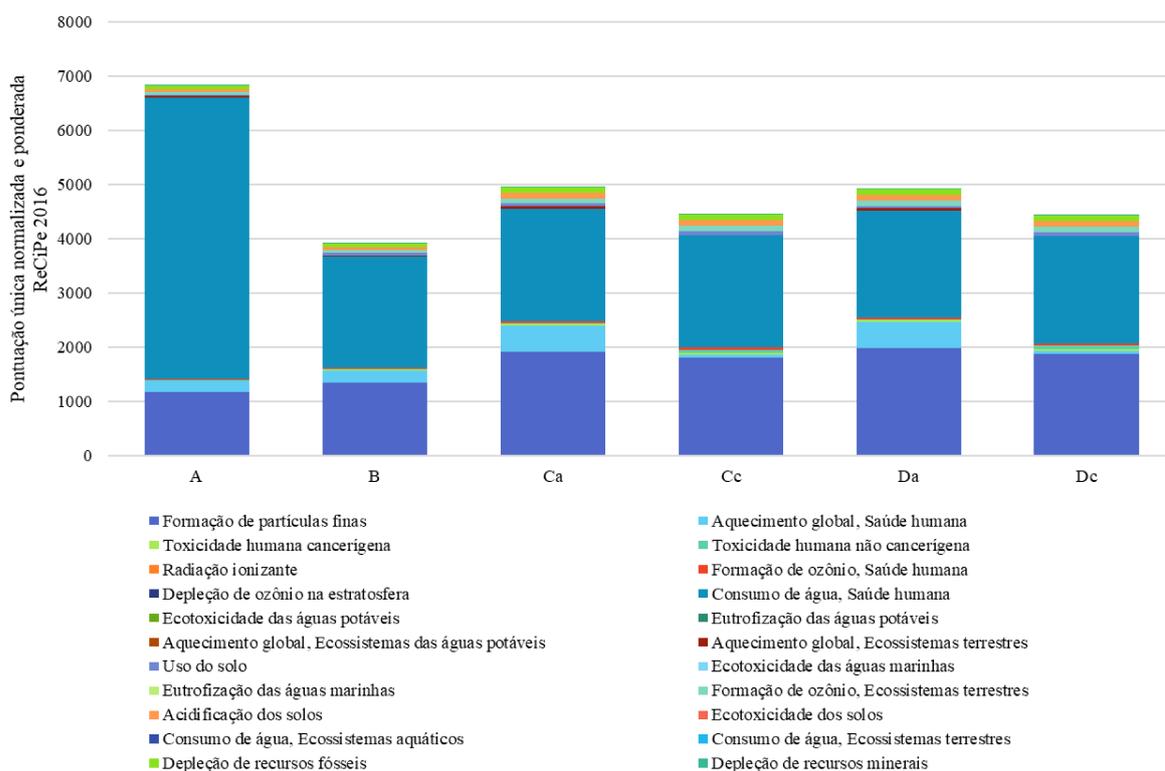
Figura 71 – Comparação de pontuação única (*endpoint*) normalizada e ponderada, para os três grupos e seis cenários.



O cenário A apresentou os menores impactos em recursos e ecossistemas, uma vez que é o cenário com menor uso de materiais. Porém, em contrapartida, devido ao maior consumo e consequentes impactos para produção de água potável, apresentou impactos à saúde humana bastante superiores aos demais cenários. Em relação aos sistemas alternativos, o cenário B é o mais ambientalmente benéfico, por produzir água para a edificação com menores impactos em recursos e em ecossistemas.

Percebe-se também que os cenários com revestimento de concreto apresentam impactos levemente superiores para a categoria de recursos, com consequentes benefícios nas categorias de saúde humana e ecossistemas. Com isso, em escala final, tem-se o cenário B como o mais otimizado ambientalmente, seguido do cenário de pavimentos permeáveis com revestimento em concreto, pavimentos permeáveis com revestimento asfáltico e, por fim, cenário convencional com revestimento impermeável. A Figura 72 mostra a pontuação final, normalizada e ponderada, dos seis cenários de modo similar às comparações anteriores.

Figura 72 – Comparação de pontuação única (*endpoint*), normalizada e ponderada, dos seis cenários.



4.4.4 Interpretação

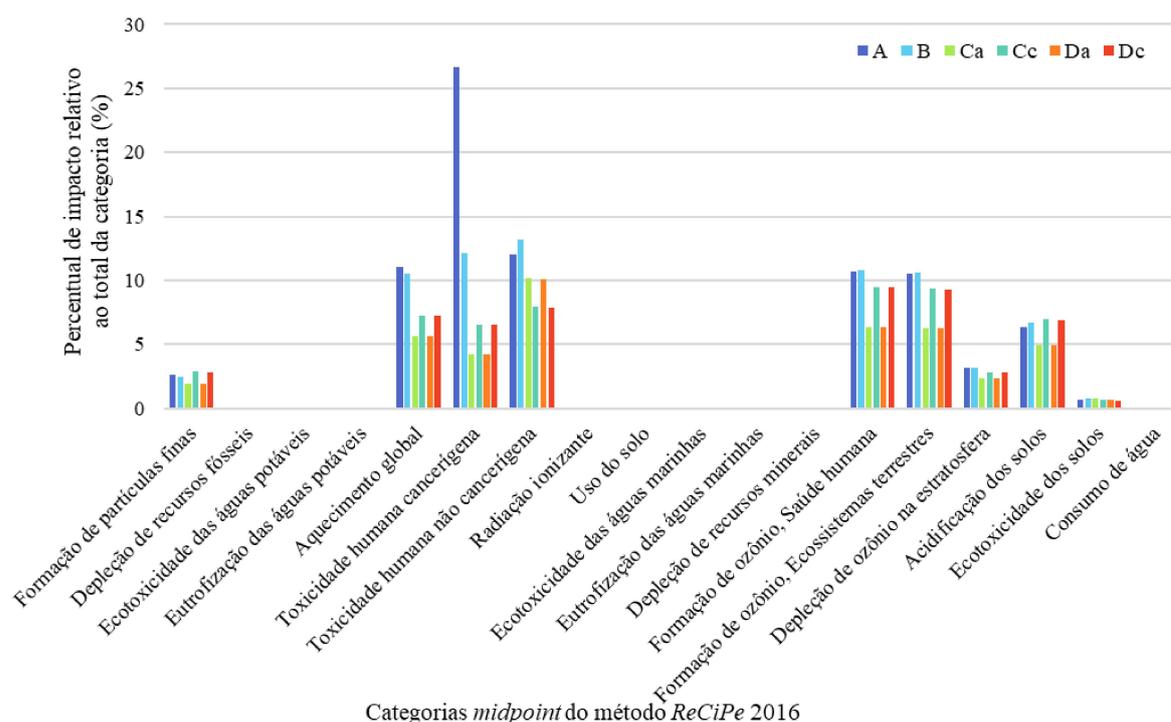
Nesta seção são discutidos os principais aspectos que influenciaram nos resultados da ACV realizada, de modo a compreender pontos de melhoria e interpretar os resultados. Para cada incerteza são comentados os elementos considerados e possíveis variações em relação as definições da pesquisa. Também são comentados aspectos de possíveis alterações para pesquisas futuras.

4.4.4.1 Quantificação do transporte

A quantificação de transporte foi realizada por meio da Tabela 14. Obviamente, para as diferentes cidades este valor pode variar, dependendo do local de fornecimento. Muitos dos materiais foram obtidos em cidades com grande distância de transporte, como o caso de alguns materiais asfálticos não produzidos na região de Florianópolis. Desse modo, pode-se levantar a pergunta de interpretação da relevância do indicador de transporte no resultado final dos sistemas.

Para responder essa pergunta, foi obtido o percentual de impacto no resultado final *midpoint* relativo ao transporte dos elementos. A Figura 73 mostra o percentual de impactos relativos ao transporte para os seis cenários modelados, conforme indicador *midpoint*. O percentual é relativo ao total de impactos positivos de cada cenário, ou seja, não foi incorporada para este percentual a fase de uso.

Figura 73 – Comparação do percentual de impacto do processo de transporte para cada categoria e cenário simulado.



Percebe-se que o transporte foi de maior relevância para os cenários A e B, primeiramente, para as categorias de toxicidade, aquecimento global, formação e depleção de ozônio e a acidificação dos solos. Deve-se esse aspecto ao menor impacto nos processos de fabricação e tratamento final dos materiais, por possuir menor quantidade de material em geral. Tal diminuição gera maior relevância da distância de transporte longa para os materiais de menor massa. Em relação aos sistemas com pavimentos permeáveis (Ca, Cc, Da e Dc), os cenários com revestimento de concreto foram mais influenciados, uma vez que foi considerado maior distância de transporte para as peças de revestimento.

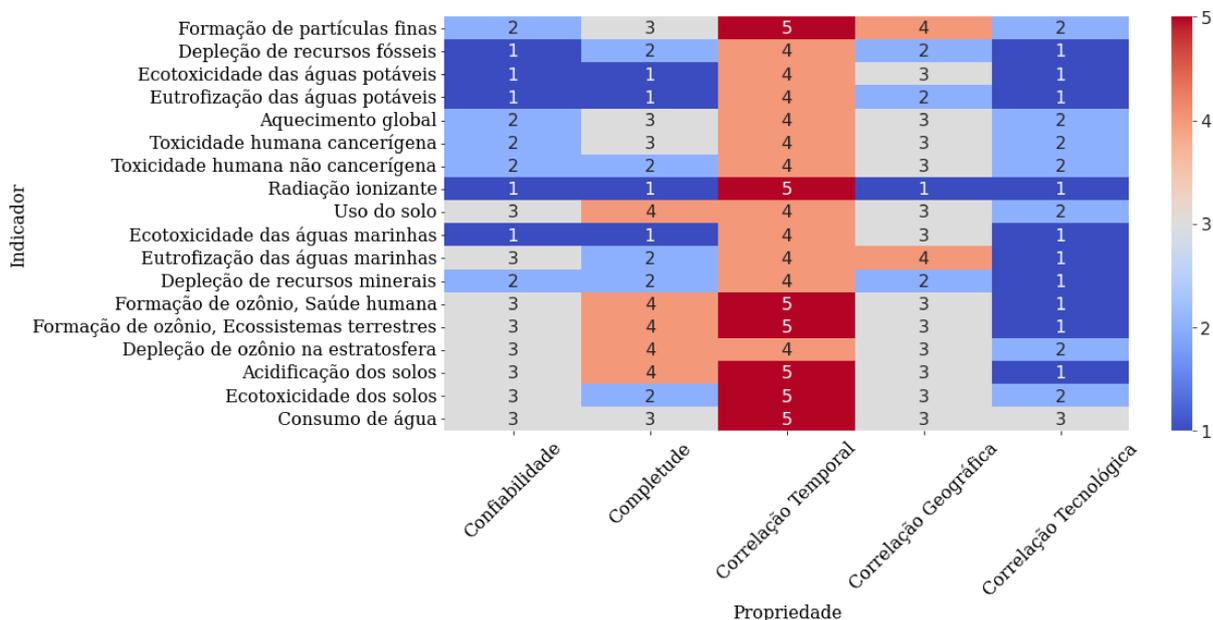
O momento de transporte obtido foi de: 47.667 tkm para o Cenário A; 48.818 tkm para o Cenário B; 60.752 tkm para o Cenário Ca; 104.451 tkm para o Cenário Cc; 60.801 tkm para o Cenário Da e 104.500 tkm para o Cenário Dc. Ou seja, mesmo que apresente mais que o dobro de momento de transporte dos cenários A e B, os cenários com concreto apresentaram impactos representativos inferiores (menos de 10%). Também se cita que para toxicidade humana cancerígena, o cenário A apresentou mais de 25% do indicador representado pelos processos de transporte. Porém, também é possível observar na Tabela 16 que o indicador é cerca de dez vezes menor que o dos demais cenários, mostrando a facilidade para representatividade do indicador por um só grupo de processos (transporte).

Estima-se que a alteração dos parâmetros utilizados na Tabela 14 em pequenas variações (mantida a proporção entre as distâncias escolhidas) não altere a ordem dos resultados e discussões realizadas. Essa estimativa parte do princípio que as categorias de consumo de água, depleção de recursos e formação de partículas finas apresentaram baixa ou nula influência, enquanto foram de alta relevância para os resultados finais da ACV (*endpoint*). Na Figura 72 fica de fácil visualização como os indicadores citados representam a majoritária parte do resultado final (mais de 80% da pontuação *endpoint*).

4.4.4.2 Sistema de qualidade de dados

O uso de processos *Ecoinvent* representa incertezas sobre a concordância tecnológica, geográfica e temporal, como também sobre completude e confiabilidade. Desse modo, algumas dúvidas surgem sobre a qualidade exigida e os processos utilizados. Para analisar tal dúvida, pode-se utilizar o procedimento de avaliação da qualidade dos dados do programa *OpenLCA*, junto com o sistema de qualidade de dados do *Ecoinvent*. Ao final, analisando em média os resultados para os seis cenários, foi obtida a Figura 74.

Figura 74 – Matriz de qualidade de dados média para os dezoito indicadores *midpoint* e os seis cenários simulados.



Percebe-se que as propriedades de correlação tecnológica e confiabilidade se encontram com boa ou ótima definição dentro dos processos do *Ecoinvent*. Tal fator se dá pelo uso de processos específicos em muitos dos casos, com poucos processos genéricos. Um exemplo é o uso de tratamento de resíduo inerte para aterro sanitário, que foi utilizado somente para materiais sem processos de resíduo específico.

Para as propriedades de completude e correlação geográfica obteve-se média representatividade. Completude diz respeito à representatividade dos processos com os produtos inseridos no mercado, ou seja, uma média das empresas com maior produção, por exemplo. Ambas as propriedades foram classificadas como "média" devido à utilização de novos exemplos brasileiros, com bastante completude e correlação geográfica, ao contrário de alguns processos europeus de baixa completude e correlação geográfica.

Por fim, a propriedade de correlação temporal foi a de pior qualidade com os indicadores finais. Tal fato ocorre devido ao tempo necessário para a disponibilização dos inventários para o meio acadêmico, somado ao tempo de inserção no banco de dados e realização da ACV. O *Ecoinvent* apresenta muitos dados recentes, como a já citada parceria com a Rede ACV. Porém, dada a variedade de processos utilizados para os modelos finais (mais de 13.000), sabe-se a dificuldade de possuir todos os processos atualizados. Obteve-se, desse modo, categorias de índice 4, representando dados com média entre 10 e 15 anos; e 5, representando dados com média de mais de 15 anos.

Para o indicador com maior relevância na pontuação *endpoint*, consumo de água, vê-se média qualidade para as propriedades de confiabilidade, completude,

correlação geográfica e tecnológica. Para a correlação temporal vê-se péssima concordância. Em futuras pesquisas o processo pode ser abordado com maior especificidade, de modo a diminuir incertezas quanto à qualidade dos dados. Pode-se realizar isso através da modelagem específica do processo local, de acordo com um inventário específico da região para cada m³ fornecido de água potável.

4.4.4.3 Valor social, estético e educacional

Os cenários Ca, Cc, Da e Dc apresentaram maior impacto geral que o fornecimento somente por telhados (cenário B), porém contemplam o sistema sustentável (SUDS) de pavimentação permeável. Desse modo, é válido ressaltar que alguns aspectos gerais fornecidos pelos SUDS não são inseridos na ACV e geram benefícios globais que devem ser discutidos. Dentre os benefícios propiciados citam-se os valores social, estético e educacional.

Primeiramente, o valor social indicado pelo SUDS encontra-se na fundamentação do conceito. Por ser um sistema dito sustentável tem-se também o objetivo de garantir respeito quanto à tríade de economia, sociedade e meio ambiente. Obviamente o respeito social e econômico também podem ser garantidos no caso base, porém são mais facilmente lembrados nos sistemas com SUDS, pela fundamentação do tema. Desse modo, garantem-se os direitos sociais, como a correta tributação dos produtos e a equidade em termos de valorização dos empregados, entre outras abordagens.

Em termos estéticos, o uso de pavimentação permeável é capaz de diminuir a quantidade de empoçamentos devido à abordagem difusa de infiltração. Enquanto uma boca de lobo pode ser facilmente bloqueada por rejeitos, a pavimentação permeável expande a área de captação, evitando pontuais interrupções de fluxo. Diversos trabalhos concordam com a diminuição do escoamento superficial também, evitando que sejam observados empoçamentos. Desse modo, garante-se uma valorização estética.

O uso de SUDS também possibilita valor educacional. Com o uso de sistemas alternativos pode-se inserir mais facilmente a educação ambiental em centros de ensino, com a exemplificação de sistemas sustentáveis próximos. Aproximam-se os discentes da realidade que se almeja para o futuro, com maior resiliência urbana. De mesma forma que painéis solares têm auxiliado na discussão sobre economia de energia e independência da rede, o uso de sistemas individuais de captação de água pluvial auxiliam na disseminação do conceito de sustentabilidade. Outros conceitos educacionais também pode ser extraídos dos modelos de concreto, como conhecimento adicional sobre albedo, ilhas de calor e fenômenos térmicos.

Por fim, alguns benefícios não foram incorporados na ACV, por não contemplarem o escopo desta pesquisa. A diminuição de ruídos gerados pela passagem de veículos e os efeitos térmicos da mudança de albedo para as edificações próximas são exemplos de benefícios não avaliados. Até o presente momento nenhuma pesquisa

encontrada contemplou todos os benefícios citados. Os três contextos citados, estético, social e educacional, somados aos benefícios não indicados na ACV são argumentos que podem fazer tomadores de decisão escolherem os sistemas alternativos de pavimentação. Vale ressaltar também que a pontuação final de alguns dos cenários, como o Cc e Dc, variou menos de 15% em relação ao cenário B, denotando pequeno aumento. Dentro das incertezas obtidas ao modelar o sistema, tal variação não denota mudança significativa de dano ambiental.

4.4.4.4 Incertezas de projeto

Além das incertezas já associadas aos processos, exemplificada pela qualidade dos dados, outras características inserem variabilidade aos resultados. Para debate foram separadas as incertezas em três categorias: dimensionamento do pavimento, potencial de economia de água potável e dimensionamento da drenagem.

Primeiramente existe variação intrínseca ao modelo de cálculo do dimensionamento do pavimento. O método da AASHTO (1993), utilizado para todos os três modelos de pavimento, apresenta variação nas considerações de coeficientes para os materiais. Também pode diferir do modelo usualmente considerado para projetos brasileiros. A escolha dos parâmetros e do programa para o dimensionamento foi feita de acordo com o estudo de Martins Vaz *et al.* (2021b), baseado em literatura e manuais internacionais. Mais especificamente para os parâmetros estruturais, uma análise específica de estudo de caso com o teste do módulo de resiliência dos materiais poderia retirar essa incerteza. Em relação aos parâmetros hidráulicos, um teste de permeabilidade dos materiais também auxiliaria em maior detalhamento do modelo de cálculo.

Em segunda etapa, o modelo de cálculo do potencial de economia de água potável também apresenta incertezas. Primeiramente o modelo importa dados de forma determinística, o que garante incerteza em relação aos parâmetros estocásticos, como o consumo hídrico e a pluviometria. A análise com série história de precipitação auxilia na suavização dessa incerteza, por meio de média história, porém também não considera variação climática para o futuro. Soma-se também demais incertezas relacionadas ao modelo de cálculo, como o uso de parâmetros determinados, os quais podem apresentar variabilidade. São os casos dos parâmetros "coeficiente de escoamento superficial" e "percentual de substituição de água potável por água pluvial". Por fim, os resultados estabelecidos do Netuno apresentam variação, uma vez que a definição do volume de reservatório é discreta e a opção por um reservatório maior representaria maior potencial de economia de água potável com consequente maior gasto de materiais. Tal variação foi abordada de modo determinístico, para inserção na ACV, mas pode ser tratada futuramente como variação estatística.

Demais incertezas na quantificação do inventário podem também influenciar nos

resultados da ACV, e desse modo foram explicadas na maior especificidade possível. Espera-se sempre que a ACV tenha o maior detalhamento possível, dadas as proporções de relevância e de escopo. Porém, dúvidas quanto aos valores inseridos sempre estão presentes. Para trabalhos futuros recomendar-se-á a utilização de modelos estatísticos, com variabilidade introduzida, para composição do inventário. A simulação de Montecarlo foi utilizada neste estudo para avaliação da variabilidade intrínseca ao banco de dados utilizado, conforme abordado na seção 4.4.7. Desse modo, almeja-se tentar diminuir um pouco das incertezas aqui contempladas.

4.4.4.5 Relevância do processo de produção de água para a ACV

Conforme o indicador *endpoint* de "consumo de água" foi responsável pela maior pontuação em todos os cenários, fez-se uma análise específica desta etapa. O principal processo responsável pelo impacto ambiental proposto foi o de "*tap water production, conventional treatment | tap water | Cutoff, U - BR*", adaptado conforme o SNIS para o gasto energético e com os demais subprocessos internos mantidos. O processo é baseado na pesquisa de Guanais *et al.* (2017), na qual os autores realizaram o inventário de produção de água na cidade de Feira de Santana, Bahia. Ou seja, inserem-se diversas incertezas nos resultados finais por uso deste inventário adaptado, como as diferenças para outras plantas de Estação de Tratamento de Água (ETA). Porém, crê-se que seja uma boa referência inicial dos impactos de produção de uma ETA, bem como os impactos da extração da água de corpos hídricos.

Os altos impactos ambientais também podem ser relacionados ao modelo de normalização e ponderação, que é baseado em parâmetros internacionais. Ou seja, ao se analisar a relevância da retirada de água de corpos hídricos é estabelecida uma referência internacional de escassez hídrica, a qual é superior a do Brasil. Tal prerrogativa pode ser validada pela literatura que indica o Brasil como país com regular ou boa disponibilidade hídrica média. Porém, pode-se argumentar que é válido utilizar referências internacionais por existir o potencial de uso da água no Brasil como produto de exportação e combate à escassez mundial. Também se cita a escala continental do país, a qual pode levar à escassez local e melhor correlação com a mesma relevância que é dada mundialmente à falta de água.

Como referência, foi obtido o percentual final de relevância de impacto do consumo de água para cada cenário. Para o cenário A, caso base, o consumo de água nas edificações foi responsável por 76,0% da pontuação final, ao passo que são 45.143 m³ consumidos durante o horizonte de análise. Para os demais casos tem-se variação entre 40,0% (cenário Da) e 52,4% (cenário B). Obviamente o cenário B apresenta maior percentual de correspondência por possuir menos materiais no inventário, e menor impacto *endpoint*.

Ou seja, o processo de produção de água foi de extrema relevância para a ACV

por possuir escala muito superior a dos demais indicadores. Desse modo, mesmo que tenha sido debatido o impacto das demais fases e itens para cada um dos indicadores, o consumo maior de água foi capaz de ultrapassar os demais impactos e gerar a compensação ambiental. Acredita-se que a variação desse indicador pode sim modificar os resultados obtidos na pesquisa e, dessa forma, exige-se maior atenção em futuros estudos. Outras opções de captação podem também ser debatidas, como o uso de água de poços artesianos e a dessalinização. De modo geral, para cada diferente modelo de ETA utilizado, esperam-se variações que podem sim modificar os resultados obtidos nesta pesquisa.

4.4.4.6 Normalização e ponderação do nível *endpoint*

O processo de normalização e ponderação foi realizado por meio dos coeficientes indicados para o método *ReCiPe* 2016, conforme indicação no *OpenLCA*. Porém, a inserção destes coeficientes gera incertezas ao projeto final, uma vez que são determinísticos e baseados na relevância que é dada a um certo parâmetro. Por exemplo, um metro cúbico de água pode ter uma relevância média global dada pelo modelo de normalização e ponderação, que pode diferir entre o Brasil e a Europa. Desse modo, é válido ressaltar que os resultados finais podem diferir se novos coeficientes forem introduzidos no sistema. De qualquer forma, a análise em *endpoint* é importante para mais facilmente visualizar as diferenças ambientais, com as discussões específicas demonstradas nas seções anteriores. Recomenda-se debater, em trabalhos futuros, novos coeficientes de normalização e ponderação, conforme o avanço de debate sobre o tema.

4.4.4.7 Introdução de reciclagem no sistema

Reciclagem foi comentada na dissertação como uma possibilidade futura, porém o tratamento final foi analisado conforme destinação para aterro sanitário. Desse modo, é necessário comentar novamente dos potenciais de reciclabilidade e mudanças dos resultados em relação ao tema. Espera-se que com o passar dos anos, e a atenção crescente que é dada ao tema de sustentabilidade, mais e mais se adotem estratégias de economia circular e inserção de materiais reciclados como matéria prima.

Em relação ao pavimento, o uso de asfalto, por exemplo, é facilmente associado com o processo de reciclagem. As peças de concreto também podem ser trituradas e utilizadas como matéria prima para uma série de produtos, modificando a destinação final utilizada. Em análises futuras, com mais cenários modelados, pode-se avaliar o uso de material reciclado incorporado nos pavimentos, bem como os diferentes modelos de tratamento dos resíduos. Materiais alternativos também podem ser inseridos, caso a reciclagem seja mais usual, como a troca das tubulações, reservatórios e outros materiais do inventário. Espera-se, desse modo, poder avaliar novas configurações

de ACV, das quais espera-se diminuir os impactos iniciais dos sistemas, de grande relevância para os resultados obtidos nesta pesquisa.

4.4.5 Discussão sobre diferenças entre as cidades

Também é necessário retomar a discussão sobre as seis diferentes cidades avaliadas. Foram organizados grupos de diferenças em parâmetros para melhor debater o impacto da escolha da cidade para os resultados finais. Tais diferenças apresentam impactos em relação à ACV e a análise geral de sustentabilidade dos cenários. Os grupos selecionados para serem observados são:

- Influência da precipitação prévia sobre a ACV;
- Influência da curva IDF da cidade no modelo final do pavimento;
- Modelo discreto de dimensionamento da drenagem;
- Influência da mudança climática sobre a ACV;
- Especificidades locais.

4.4.5.1 Precipitação prévia e potencial de economia de água potável

Primeiramente, os resultados de potencial de economia de água potável entre as cidades divergiram conforme mostrados anteriormente. Tal diferença corresponde diretamente em mudanças no inventário de consumo de água, as quais agregam ao indicador *endpoint* de maior impacto potencial para o sistema. Desse modo, é de importante análise a precipitação utilizada para a simulação, uma vez que menores potenciais de economia de água potável, como o de Brasília, podem ser responsáveis pela não compensação ambiental do sistema.

A diferença dos potenciais de economia de água potável entre o cenário A e o Dc, para qualquer das cidades, não ultrapassou 3%. Porém, a diferença entre as cidades é de maior escala, ultrapassando 23% entre Brasília e Manaus. Ou seja, espera-se que os resultados de ACV para as duas cidades sejam muito diferentes. Outro ponto importante é que a análise final da ACV mostrou que os 3% de diferença obtidos entre cenários foram relevantes para a análise, vide comparação entre os cenários Ca e Da. Ou seja, variações no potencial de economia de água potável demonstraram-se impactantes nos resultados finais da ACV.

Como exemplo, a Tabela 17 mostra a pontuação *endpoint* que seria obtida pelo consumo de água nos seis cenários. Para tal foi modelada a entrega do volume de água potável para cada caso, conforme fora simulado anteriormente para Florianópolis na ACV. Como referência foram utilizados os resultados para o reservatório inferior de 45.000 litros. Percebe-se que grande parte do impacto é relacionado à captação

de água, conforme discutido anteriormente. Também é possível notar que as cidades de Belo Horizonte e Brasília apresentaram impacto bastante superior à referência de Florianópolis, com pontuação 50% superior. Ou seja, a variação de pontuação devido à economia de água potável entre as cidades é de extremo impacto. A opção por utilizar os impactos máximos em contrapartida dos mínimos aumentaria o sistema em 1334 pontos, o equivalente a um acréscimo de 20% de impacto do cenário A ou 34% do cenário B.

Tabela 17 – Pontuação *endpoint* a ser conferida para o consumo de água em cada um dos cenários e cidades (volume do reservatório inferior de água potável com 45.000 litros).

Cenário	Cidade					
	Belo Horizonte	Brasília	Florianópolis	Manaus	São Paulo	Salvador
A	5313 ¹					
B	3059	3086	2011	1833	2441	1960
Ca	3059	3086	2011	1833	2441	1960
Cc	3040	3070	1987	1819	2418	1936
Da	2953	2990	1889	1756	2322	1824
Dc	2946	2986	1884	1752	2318	1819

¹ Igual para todas as cidades e cenários por ter sido utilizado o mesmo consumo hídrico e edificação modelo para análise.

Para cada cidade também foi obtido um volume ótimo diferente para o reservatório inferior. Ou seja, a modificação da cidade gera diferentes curvas de otimização do potencial de economia de água potável, a qual modifica os inventários do reservatório inferior de água pluvial. As modificações ocorrem de modo não-linear, fator que dificulta a otimização ambiental. Porém, se realizadas as avaliações para um mesmo volume de reservatório, obtêm-se as variações indicadas na Tabela 17. Em trabalhos futuros pode-se realizar a incorporação das duas metodologias, ACV e simulação do potencial de economia de água potável, em uma só rotina de cálculo. Desse modo explora-se melhor a otimização do sistema ambientalmente.

4.4.5.2 Curvas Intensidade-Duração-Frequência

Também se modificam entre as cidades os parâmetros de pluviometria extrema. Florianópolis, por exemplo, foi a cidade com as maiores precipitações diárias observadas e maiores precipitações extremas, em agregação de cinco dias. Tal diferença é traduzida para o parâmetro IDF que por sua vez é traduzido para o dimensionamento hidrológico-hidráulico do pavimento e dimensionamento da drenagem.

Desse modo, a IDF altera diretamente a lâmina de água na *reservoir course* e a consequente espessura necessária para não ocorrer o fenômeno de escoamento superficial por ineficiência hidráulica. Ou seja, vê-se uma correlação do modelo de

dimensionamento com um item do inventário da ACV e consequentes impactos ambientais iniciais e finais. Todavia, conforme observado na seção de dimensionamento hidráulico do pavimento, para a presente pesquisa não houve diferenças para o dimensionamento hidrológico-hidráulico entre as cidades. Tal fato ocorre pois o dimensionamento estrutural exigiu espessuras de *reservoir course* superiores às exigidas pela vertente hidrológico-hidráulica.

Recorda-se que o ISC utilizado para o subleito foi o mínimo admitido por manuais de SUDS, o qual gera a maior espessura de *reservoir course* exigida estruturalmente. Ou seja, na ocorrência de solos mais resistentes, ter-se-á uma espessura estrutural menor e a possibilidade da demanda hidrológico-hidráulica exigir espessuras superiores de *reservoir course*. Para este caso, a diferença de IDF pode gerar modificações no inventário, obtendo diferentes modelos finais de pavimentos permeáveis para as diferentes cidades.

4.4.5.3 Projeto de drenagem

A mudança de IDF também é relevante para os cálculos de precipitação incidente extrema e consequente dimensionamento da drenagem. Para IDFs que gerem maiores chuvas de projeto, deve-se produzir um sistema mais robusto que comporte a vazão incidente. Desse modo, para cada cidade existem diferenças no inventário de drenagem devido à natureza diferente de precipitação.

O projeto de drenagem também apresenta características específicas para cada localidade, uma vez que existem manuais e normas de cada cidade. Outro ponto interessante é a natureza discreta dos resultados. Ou seja, um pequeno aumento no volume de água transportado pode modificar uma tubulação de um determinado diâmetro para o imediatamente superior. Tais resultados modificam discretamente na ACV, de modo que existam padrões de otimização (valorização máxima de um determinado diâmetro) para cada cidade e configuração de tubulação no terreno. A automatização e otimização da distribuição da drenagem no terreno, com o exemplo de uso da teoria dos grafos, pode ser uma técnica a melhorar a robustez do modelo e melhor avaliar a intrínseca variabilidade do projeto de drenagem.

4.4.5.4 Mudança climática

Todos os resultados citados correspondem ao padrão de precipitação prévia, conforme observado nas primeiras seções de interpretação. Ou seja, estão estabelecidos conforme o padrão observado nos últimos anos de disponibilidade de água pluvial, e nos estudos já realizados de IDFs. Porém, é válido ressaltar que estes valores não são estáticos e dependem de uma série de variáveis de mudança global para estruturação. Desse modo, conforme explorado na revisão de literatura e em diversos estudos recentes, incertezas acerca da variabilidade climática são existentes.

Em geral, a Figura 39 mostra as projeções de variação da precipitação, na qual percebe-se tendências diferentes entre as cidades. Esta variação ocorre na modificação do volume anual e no deslocamento dos volumes mensais precipitados, afetando o potencial de economia de água potável. Brasília, por exemplo, apresentou acréscimo de precipitação nos meses de dezembro a março, período de férias escolares, e decréscimo nos meses de maio a novembro, período majoritariamente letivo. Essa mudança específica altera completamente o potencial de economia de água potável e conseqüentemente o principal processo de impacto final, relacionado à água potável disponibilizada.

Obviamente que as tendências possuem escala de análise bastantes superiores que a especificidade dos dados inseridos no Netuno (mês ou ano em comparação ao dia). Desse modo, a análise simplificada de que deve ocorrer aumento dos impactos ambientais é baseada na condição de menor disponibilidade hídrica durante os períodos de aula. Estudos futuros podem introduzir essa variabilidade com cadeias de Markov, por exemplo, gerando perfis de disponibilidade diária para inserção nas simulações. Dentro das limitações desta pesquisa, objetivou-se debater os impactos em escalas maiores, conforme realizado.

Em relação aos modelos de IDF, trabalhos futuros podem melhor modelar a comparação da drenagem atual com estimativas para 2050 e 2100, por exemplo. Nenhum trabalho foi encontrado na literatura, durante a realização da pesquisa, com a estimativa da mudança dos coeficientes de IDF para as cidades simuladas. Com o aumento da notoriedade das precipitações extremas, e conseqüente receio acerca da efetividade da drenagem, espera-se ver maiores campos para introdução deste tema na ACV. Por meio desta variação muitos dos itens do inventário devem ser alterados, como diâmetro de tubulações e número de bocas de lobo, com conseqüente aumento no impacto final obtido em todos os cenários.

4.4.5.5 Especificidades locais

Especificidades locais também devem ser levadas em consideração como possíveis alterações entre as cidades. Conforme condicionado no escopo desta pesquisa, o local de aterro sanitário e as distâncias de transporte levam em consideração a realidade local. Diferentes cidades, principalmente de núcleos universitários mais distantes de grandes centros urbanos, devem possuir deslocamentos de transporte superiores. A possibilidade de uso de água também depende de edificações do porte da edificação modelo, o que contempla diretamente universidades maiores, conforme existência nas cidades escolhidas. Demais especificidades culturais em relação ao uso de água também podem modificar os resultados.

4.4.6 Potenciais melhorias para o sistema

Algumas alterações de inventário surgem como ideias para trabalhos futuros que busquem otimizar ambientalmente qualquer um dos cenários. Por exemplo, a alteração dos materiais dos reservatórios de água (concreto armado e PEAD) por outros materiais (fibra de vidro ou novas tecnologias) é uma das possibilidades. A opção por usar PEAD e concreto armado contempla os requisitos de desempenho e os materiais frequentemente utilizados em Florianópolis. Ghimire *et al.* (2017), por exemplo, realizaram uma análise de sensibilidade com reservatórios em fibra de vidro e PEAD, obtendo que fibra de vidro foi mais impactante na maior parte dos indicadores da ACV.

Outra alteração possível é a otimização do sistema de bombeamento. Pode-se incorporar diferentes arranjos de motobombas, bem como diferentes tecnologias, para diminuir os impactos no consumo de energia. A alteração pode advir desde princípios de projeto, de modo que o arranjo de tubulações, posição das estruturas e o sistema hidráulico seja otimizado.

4.4.7 Análise de sensibilidade (Simulações de Montecarlo)

4.4.7.1 Resultados *Midpoint*

A Figura 75 mostra, como exemplo, a variação dos resultados do indicador formação de partículas finas, por meio de gráficos de violino. A Tabela 18 mostra os valores estatísticos obtidos, bem como os impactos obtidos por meio da análise determinística, sem a simulação de Montecarlo, e o coeficiente de variação (CV) para todas as os seis cenários. O CV serve como medida adimensional de dispersão, de modo que se compreenda a variabilidade em relação à média. Desse modo, resultados com maior desvio padrão ou média mais próxima de zero apresentaram maiores coeficientes de variação.

O Apêndice E mostra os gráficos de violino, Figuras 84 a 100, e dados estatísticos, Tabelas 22 a 38, dos demais dezessete indicadores *midpoint* do método ReCiPe 2016. De modo geral, observam-se diferenças entre os cenários em termos de valores mínimos, máximos, média e dispersão dos valores. Como exemplo, para a categoria eutrofização de águas marinhas tem-se uma diferença nítida na dispersão dos resultados, dos quais os cenários com revestimento asfáltico apresentam maior variabilidade nos impactos ambientais em relação aos cenários com revestimento em concreto cimento Portland. Ou seja, dentro da análise de sensibilidade obtiveram-se diferentes padrões de incerteza acerca dos impactos finais para os cenários.

Figura 75 – Variação dos resultados do indicador - Formação de partículas finas.

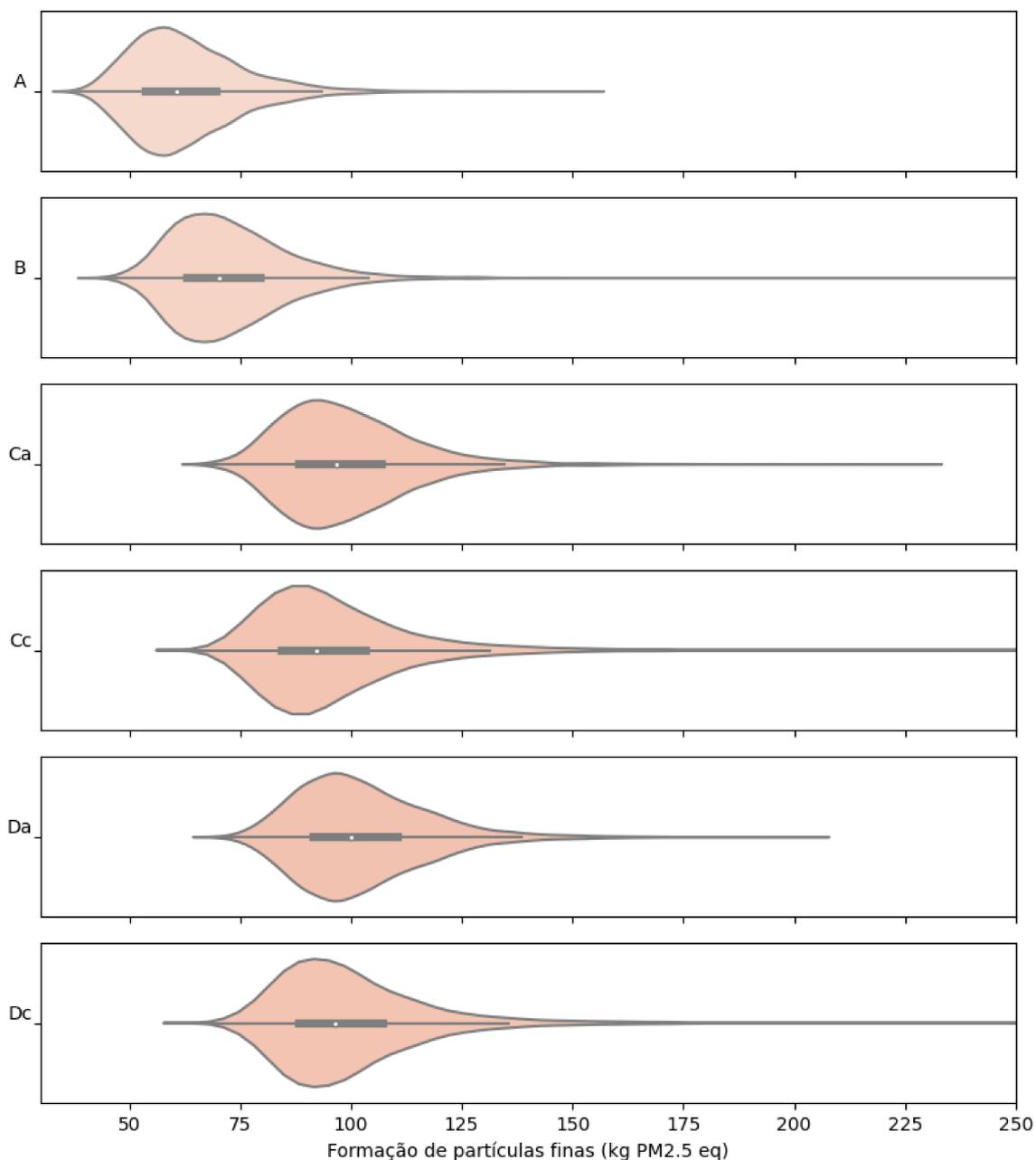


Tabela 18 – Resultados Montecarlo do indicador - Formação de partículas finas.

Cenário	Média	Valor Determinístico	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	6,27E+01	5,06E+01	1,26E+01	3,72E+01	1,52E+02	20 %
B	7,24E+01	5,85E+01	1,34E+01	4,32E+01	2,51E+02	18 %
Ca	9,89E+01	8,35E+01	1,52E+01	6,74E+01	2,28E+02	15 %
Cc	9,68E+01	7,88E+01	2,14E+01	6,21E+01	6,16E+02	22 %
Da	1,02E+02	8,66E+01	1,49E+01	6,97E+01	2,02E+02	15 %
Dc	1,00E+02	8,19E+01	1,93E+01	6,48E+01	3,87E+02	19 %

Percebe-se também uma grande diferença nos resultados de CV entre as distribuições. Desse modo, os resultados foram agrupados em dois grupos de CVs, com os limites definidos por meio de observação dos resultados. Os grupos são:

- Baixa variabilidade - CV menor que 50%;
- Média ou alta variabilidade - CV acima de 50%.

Para o grupo de baixa variabilidade observam-se distribuições bem definidas, porém sem modificar a escala dos potenciais impactos. Ou seja, por mais que a variabilidade exista, não é observada modificação na escala (potência de dez) do impacto entre os modelos simulados. Neste grupo estão onze dos indicadores, contemplando a formação de partículas finas, depleção de recursos fósseis, aquecimento global, uso do solo, eutrofização das águas marinhas, depleção de recursos minerais, formação de ozônio, saúde humana, formação de ozônio, ecossistemas terrestres, depleção de ozônio na estratosfera, acidificação dos solos e ecotoxicidade dos solos.

A definição como baixa variabilidade não significa que a variação do resultado *midpoint* não seja relevante. Por exemplo, dentro do indicador "eutrofização das águas marinhas" no valor determinístico tem-se o cenário Cc com 30% menos impacto em relação ao cenário Ca. Porém, percebe-se também grande sobreposição das curvas probabilísticas, uma vez que o cenário Ca possui um desvio padrão quatro vezes maior. Ou seja, dentro das limitações de variabilidade do banco de dados *Ecoinvent*, tem-se ambos os cenários com possíveis impactos similares, mesmo que se esperem impactos maiores dos cenários com concreto asfáltico.

Para o grupo de média ou alta variabilidade tem-se incertezas capazes de modificar a escala de impactos ambientais. O exemplo mais importante é o da categoria de consumo de água conforme maior impacto *endpoint*. Para este indicador foram observadas variações de até 10^5 m³ de água entre os valores mínimo e máximo. Outros indicadores que estão neste grupo são: ecotoxicidade das águas marinhas, ecotoxicidade das águas potáveis, radiação ionizante, toxicidade humana cancerígena, toxicidade humana não-cancerígena e eutrofização das água potáveis.

Reitera-se que o CV é relativo à média, e portanto, resultados próximos a zero e que oscilem entre positivo e negativo apresentaram CV maior. Para as categorias de ecotoxicidade e eutrofização das águas potáveis foram observados CV maiores para os cenários com pavimentos permeáveis. A fase de uso modelada na ACV foi feita de modo determinístico e sem variabilidade, e desse modo, os indicadores são somente afetados por incertezas referentes aos demais itens do inventário. Todavia, demonstra-se a variabilidade existente em relação à compensação dos benefícios do uso de pavimentos permeáveis, uma vez que pode-se zerar os impactos.

Para as categorias de toxicidade e radiação ionizante tem-se variabilidade existente em todos os cenários modelados. Os maiores CVs foram obtidos para o indica-

dor de toxicidade humana não-cancerígena. Exibe-se certa incoerência em relação à análise de qualidade de dados, uma vez que os três indicadores apresentam baixa incerteza em relação à confiabilidade, completude, correlação tecnológica e geográfica. Porém, crê-se que a variabilidade existe devido ao uso de processos com dispersão grande de impactos ambientais, como uso de componentes plásticos. Ou seja, existe baixa incerteza em relação aos processos, porém estes possuem grande variabilidade auferida.

4.4.7.2 Resultados *Endpoint*

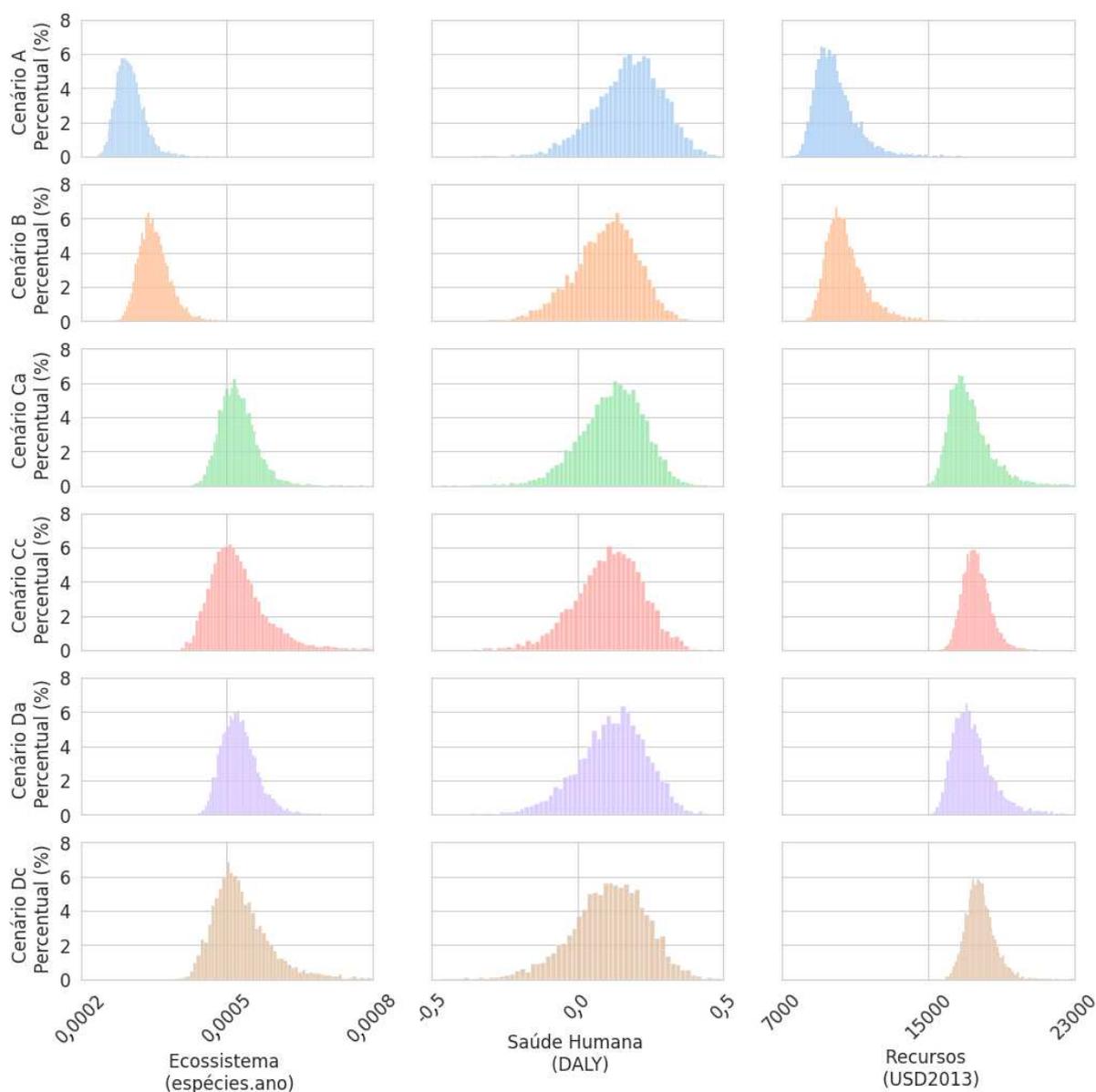
Após a avaliação individual dos indicadores *midpoint*, foi avaliada a simulação de Montecarlo nos resultados *endpoint*. Em primeira análise foram simuladas as curvas de probabilidade dos resultados e somados para cada caso os indicadores com mesma unidade. Desse modo, tem-se uma curva de resultados para as unidades DALY, espécies.ano e USD2013. A Figura 76 mostra as distribuições de resultados para as três unidades e os seis cenários de análise. Reitera-se que, nesta etapa da análise, as unidades possuem escalas diferentes, servindo somente de comparação entre cenários.

Percebe-se que as tendências observadas na análise determinística se mantêm, com maiores impactos dos cenários alternativos nas unidades de ecossistema e recursos e menor impacto na unidade de saúde humana. O uso de maior quantidade de materiais para a produção dos cenários alternativos é responsável pela diferença em ecossistema e recursos. Por sua vez, a maior quantidade de água potável consumida e seus impactos da cadeia de produção, fazem o cenário A apresentar maiores impactos em saúde humana.

Pode-se observar também que dentre as três unidades, a que apresenta maior interseção da probabilidade de ocorrência é na saúde humana. Ou seja, mesmo que observado maior impacto determinístico do cenário A, existe grande probabilidade deste impacto ser similar aos demais cenários. Para as unidades de ecossistema e recursos existe uma diferenciação nítida entre os cenários, sem sobreposição dos histogramas. Desse modo afirma-se com maior rigor científico o acréscimo de impacto ao ecossistema e recursos dos cenários alternativos.

Outra observação possível é a diferença dos cenários com pavimentação asfáltica e pavimentação de concreto cimento Portland. Para os cenários com uso de asfalto observa-se menor variabilidade de resultados em ecossistema, conforme achatamento das curvas de histograma. Para a categoria de recursos observa-se o oposto, com menor variabilidade nos cenários com cimento Portland em relação aos cenários com asfalto. De toda forma, as diferenças de dispersão não são suficientes para separar os histogramas, com interseção de probabilidade de impacto.

Figura 76 – Resultados Montecarlo em *endpoint* para os seis cenários simulados e três unidades.

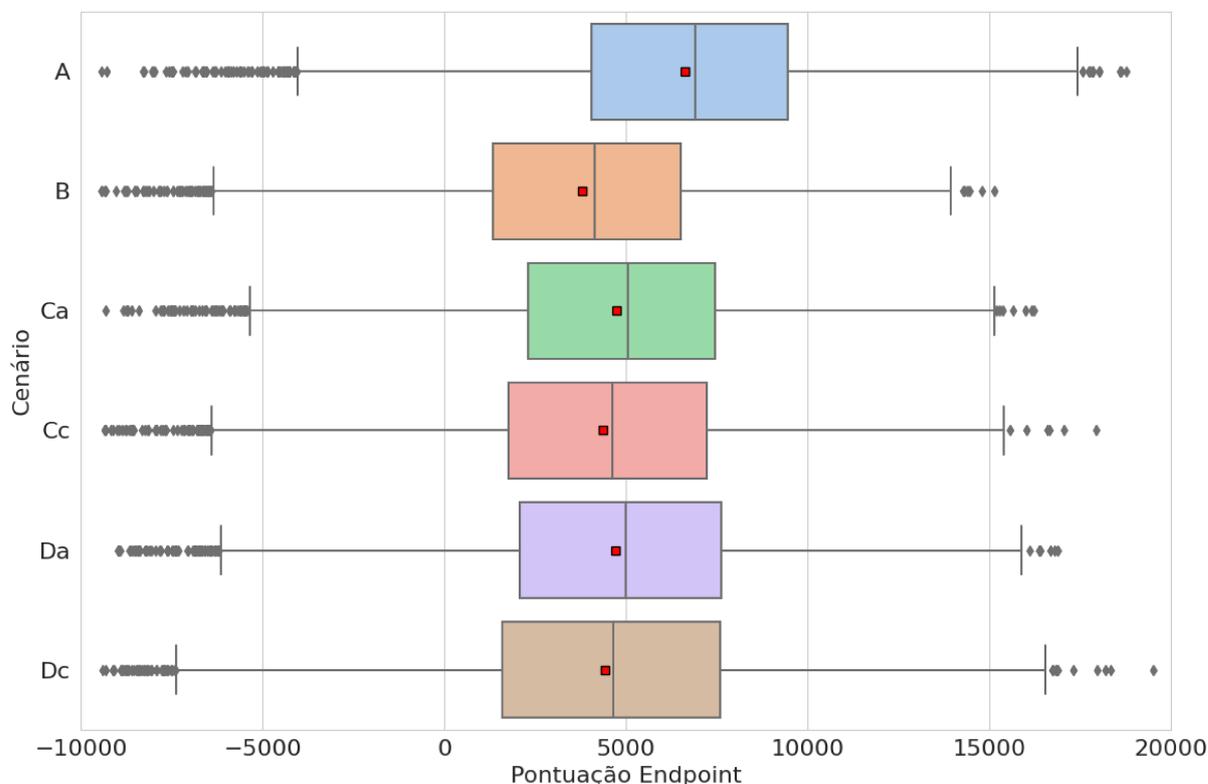


Por fim, a última análise realizada nesta pesquisa é a variabilidade dos resultados agrupados, após ponderação e normalização. A Figura 77 mostra a comparação dos seis cenários por meio de diagramas de caixa que apresentam os valores mínimos, máximos, os quartis intermediários, a mediana e a média. A média está representada pelo quadrado vermelho e os demais dados estatísticos são representados pelo diagrama.

Percebe-se que, após agrupamento, o deslocamento para valores positivos observado no histograma da saúde humana é responsável por um aumento na pontuação final do cenário A em relação aos demais cenários. Ou seja, por mais que as curvas de ecossistema e recursos sejam menos impactantes para o cenário A, a compen-

sação ocorre devido à saúde humana. Tal resultado havia sido observado na análise determinística, e é novamente representado por meio da análise de sensibilidade.

Figura 77 – Resultados Montecarlo em *endpoint* agrupado.



Os resultados demonstram a tendência de menores impactos dos sistemas alternativos, de forma similar aos resultados determinísticos. Dentre os cenários alternativos também se obtêm desvios padrões similares, em torno de 4000 pontos. Ou seja, existe certa variabilidade dos resultados, porém similar entre os cenários. Todas as simulações apresentaram presença de valores atípicos, porém com certa similaridade em relação aos valores mínimos e máximos.

Por fim, ressalta-se que os resultados apresentados e a análise de sensibilidade servem para visualizar tendências dos resultados e auxiliar na tomada de decisão. Mesmo que os impactos fossem iguais, diferentes desvios padrões poderiam representar incertezas e conseqüentemente riscos para os gestores. Porém, os resultados demonstram que os cenários alternativos apresentam menor impacto e similar incerteza em comparação ao cenário A. Soma-se também os demais benefícios dos sistemas e a resiliência às mudanças externas, como o possível aumento dos impactos relativos ao sistema da concessionária de fornecimento hídrico.

Em trabalhos futuros recomenda-se a abordagem probabilística na formulação do inventário, de modo a explorar incertezas não abordadas nesta pesquisa. Também se recomenda utilizar outras ferramentas de análise para melhorar a simulação de

Montecarlo e possibilitar maior número de resultados, como simulação em nuvem ou em *cluster* de processamento.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos corroboram com os objetivos específicos sendo cada uma das perguntas de pesquisa respondidas. Desse modo, foram obtidos resultados que respondem:

- A comparação dos potenciais impactos ambientais dos diferentes cenários modelados;
- Qual o potencial de economia de água potável por meio do uso de água pluvial para fins não-potáveis nos diferentes cenários modelados;
- Quais as diferenças entre simulações atuais para os cenários e localidades avaliadas, ao passo de discussão do impacto das mudanças climáticas na avaliação;
- Quais as fases do ciclo de vida dos sistemas que são mais impactantes ambientalmente para os sistemas propostos, enquanto foram discutidas potenciais melhorias para os sistemas propostos, bem como possíveis novas análises com menores incertezas;
- Quais os potenciais impactos ambientais da fase de uso e mitigações fornecidas pelo pavimento permeável, como redução das ilhas de calor urbano e melhoria da qualidade da água destinada à rede pública de drenagem;
- Qual a interpretação da ACV e as conclusões obtidas a partir da pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o ciclo de vida de diferentes sistemas de captação de água pluvial, dentre os quais modelos que utilizaram telhados e pavimentos permeáveis como superfícies de captação. Também foram comparados os sistemas a um sistema tradicional de pavimentação, condução de águas pluviais e fornecimento hídrico, conforme estruturas convencionais urbanas. Espera-se ampliar os conhecimentos sobre algumas das principais técnicas de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS), de modo a amplificar o potencial de utilização e auxiliar na tomada de decisão sobre modelos de drenagem.

Todos os resultados culminaram em diferentes espessuras dos pavimentos propostos, nos quais percebe-se grande variação entre os perfis finais permeáveis ou impermeáveis. O inventário de materiais apresentou grande distinção, levando a consequentes diferenças na Análise de Ciclo de Vida realizada. Também se percebe a complexidade de obter alguns dos parâmetros utilizados, o que dificulta a realização de análise homogênea de desempenho hidráulico e estrutural. Na comparação das estruturas de asfalto ou concreto, a de asfalto apresentou maior espessura necessária para a camada *reservoir course*, gerando consequente maior espessura geral do pavimento.

Com os perfis finais obtidos e o potencial de economia de água potável, foram realizados os demais dimensionamentos necessários para o sistema de drenagem, como a definição dos diâmetros das tubulações de drenagem, tamanhos de caixas de inspeção e demais dispositivos. O projeto possui natureza discreta, sendo essa uma das maiores dificuldades para contextualização das cidades para o modelo final. Ou seja, um pequeno acréscimo de intensidade pluviométrica, gerada pela diferença na curva IDF, pode modificar o diâmetro das tubulações de drenagem necessárias.

Neste contexto, observou-se que as cidades obtiveram diferentes potenciais de economia, perfis de drenagem, perfis de pavimento e projeções pluviométricas futuras. Todas as modificações foram debatidas em relação às possíveis modificações de tomada de decisão. Brasília, por exemplo, apresentou tendência de aumento da heterogeneidade pluviométrica, levando a maiores necessidades de drenagem sem obter similar redução na demanda hídrica total da edificação. Os resultados do potencial de economia de água potável responderam ao segundo objetivo específico desta pesquisa.

A partir desse ponto, foi definida a cidade de Florianópolis como referência para todas as quantificações a serem adotadas para a ACV, incluindo distâncias de transporte, tecnologias existentes na cidade e demais definições de escopo. A ACV foi realizada de modo a responder questionamentos de tomada de decisão sobre os cenários propostos. Desse modo, foram avaliados os impactos ambientais de cenários

que envolveram as etapas de: início, operação, manutenção, descarte final e uso dos sistemas. A separação teve intuito de compreender os percentuais de impactos relativos a cada fase, para discussão na etapa de interpretação.

Como resultado da ACV, percebeu-se maior relevância para a etapa inicial em todos os indicadores *midpoint* com exceção do consumo de água. A etapa de consumo de água correspondeu principalmente a impactos compreendidos na operação, visto que foram fornecidos pelo menos 16.000 m³ de água durante o horizonte de análise. Para o cenário base (A), foram fornecidos mais de 45.000 m³ de água. Também foi observada a relevância do fornecimento hídrico na análise *endpoint*, da qual o "consumo de água, saúde humana" foi o indicador com maior pontuação de impacto final, normalizada e ponderada.

Outro ponto interessante foi a compensação ambiental obtida nas categorias de eutrofização, ecotoxicidade, toxicidade e aquecimento global devido a adoção dos benefícios do uso de pavimentos permeáveis. Os benefícios categorizados (melhoria da qualidade da água, carbonatação e aumento do albedo) foram importantes para a compensação parcial ou completa de muitos dos impactos. Até o presente momento, esta é a única pesquisa que adotou, dentro de um escopo de ACV, os três benefícios citados em conjunto. Tem-se como conclusão um cenário de relevância para esta fase, devendo-se atentar sobre a contabilização dos benefícios uma vez que possuem escala similar à dos impactos das demais fases.

A carbonatação junto com o aumento de albedo foram responsáveis por reduzir o impacto do aquecimento global nos cenários Cc e Dc, próximo de zerar o impacto de carbono dos sistemas de concreto. A carbonatação forneceu diminuição de seis toneladas de CO₂, enquanto a mudança de albedo forneceu diminuição de aproximadamente 185 toneladas. Espera-se que mais estudos na área avaliem, experimentalmente se possível, a comprovação dos resultados aqui obtidos. Também é notável que poucos estudos avaliaram carbonatação de pavimentos permeáveis em geral, denotando área de possível avanço da academia.

A melhoria da qualidade da água, por sua vez, foi responsável por diminuir as categorias de eutrofização e ecotoxicidade, bem como reduzir a categoria de toxicidade humana não-cancerígena. Para as primeiras duas categorias foram observadas reduções na ordem de 10⁴ kg de 1,4-DCB equivalente e 20 a 25 kg de fósforo equivalente. Para a toxicidade humana não-cancerígena foi obtida a redução de ordem de 10³ kg de 1,4-DCB equivalente. Sabe-se que existe muita incerteza sobre a modelagem da qualidade, como a taxa de retenção dos compostos considerados e a concentração inicial na água pluvial. Porém, serve como um primeiro estudo brasileiro de ACV que incorpore a qualidade dentro do inventário de pavimentos permeáveis. Estudos com a modelagem de melhoria da qualidade da água obtiveram redução de impactos nos mesmos indicadores.

A comparação dois a dois dos cenários avaliados foi fundamental para compreensão dos potenciais de melhorias e as divergências observadas. De modo geral, o cenário B, captação somente por telhados, foi o mais benéfico por agregar pouco material a mais que o cenário base e diminuir em mais de 60% os impactos ambientais da água fornecida. Os demais cenários com pavimentos permeáveis foram mais impactantes ambientalmente que o cenário B, porém sem ultrapassar os impactos ambientais do cenário base. Percebe-se que a diminuição do consumo de água gerou compensação ambiental em todos os cenários alternativos avaliados. Com estas informações, responde-se o primeiro objetivo específico, comparando por meio da ACV os diferentes cenários avaliados.

Também foi realizada a etapa de interpretação da ACV, nas quais foram discutidas possíveis alterações na ACV, a influência do processo de transporte, as incertezas da análise, o sistema de qualidade dos dados e a análise de sensibilidade. De modo geral, percebe-se uma série de potenciais melhorias para os sistemas, como a otimização ambiental do reservatório inferior, a otimização dos sistemas de drenagem e o uso de métodos de manutenção dos pavimentos com menor impacto ambiental. A otimização da drenagem, por exemplo, pode ser realizada de modo que o sistema favoreça o uso da menor quantidade possível de materiais.

Outra conclusão obtida corrobora que o transporte de materiais foi pouco relevante para a grande maioria dos indicadores e principalmente para a pontuação final normalizada e ponderada. Porém, para alguns indicadores *midpoint* específicos, representou até 25% dos impactos potenciais. Ou seja, variações na distância de transporte não geraram grandes modificações no resultado *endpoint*, porém impactaram na análise de indicadores *midpoint* específicos, como toxicidade, aquecimento global e formação ou depleção de ozônio.

O sistema de qualidade de dados também foi fundamental para compreender quais características dos processos apresentaram maiores incertezas na projeção final da ACV. Percebe-se uma dificuldade de obter processos recentes nos bancos de dados, com a grande maioria dos processos utilizados tendo mais de quinze anos. Desse modo, as incertezas foram analisadas e métodos para a solução e minimização destas incertezas foram introduzidos, principalmente como indicação para pesquisas futuras.

Foram também discutidas características das mudanças climáticas e das diferentes cidades, de modo a compreender a internacionalização (reprodutibilidade em outros locais) desta pesquisa. Percebe-se que uma série de incertezas são introduzidas devido ao modelo de precipitação de cada local, bem como as variações no modelo de precipitações futuras. Todas as curvas IDF foram baseadas em artigos locais relacionados a séries históricas, com a inexistência de um banco de dados de previsão de IDF, de modo a planejar situações futuras de drenagem urbana. Cita-se também a

inexistência de um banco de dados nacional recente de IDF, sendo pesquisada cidade por cidade.

De mesma forma, acredita-se que os sistemas propostos podem ser aplicados a qualquer cidade mundial, dado o método proposto. Conforme discutido e amplamente divulgado, grande parte do mundo experienciará aumento das precipitações extremas. Esse aumento fará com que os sistemas atuais de drenagem se sobrecarreguem, com a abordagem difusa de pavimentos permeáveis tornando-se uma potencial ferramenta mitigadora. Em segunda análise, os pavimentos funcionam também como reservatório adicional de retenção, diminuindo a vazão de pico da drenagem. Ambos os sistemas somados com os resultados da ACV e os benefícios contemplados demonstram o potencial de utilização da técnica.

Por fim, a análise de sensibilidade mostrou as variabilidades existentes nos cenários modelados. Percebe-se que, de modo geral, os resultados foram similares aos obtidos de forma determinística, com as mesmas indicações de tomada de decisão. Para alguns indicadores *midpoint* foram observadas diferenças na distribuição probabilística entre os cenários asfálticos e de cimento Portland, denotando maior variabilidade no potencial impacto ambiental. Estes resultados, somados às comparações dois a dois auxiliam na melhor visualização dos potenciais impactos ambientais dos sistemas. Todos os processos da etapa de interpretação foram utilizados para responder os três últimos objetivos específicos, auxiliando na compreensão das características propostas para a ACV.

Conclui-se, dessa forma, que pavimentos permeáveis demonstram inúmeros potenciais em sua utilização. Sejam econômicos, ambientais, sociais ou técnicos, os benefícios citados mostram-se eficientes ferramentas para problemas atuais e futuros de projetos urbanos. Em comparação com outros sistemas alternativos, como a captação de água pluvial por telhados, tem-se acréscimo de impacto ambiental. Porém, tal acréscimo é pequeno comparativamente (10-20%) e deve ser analisado com detalhe pelos tomadores de decisão. Acredita-se que os benefícios adicionais podem trazer ganhos não considerados usualmente por projetistas, conforme apresentado neste trabalho.

5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O projeto foi realizado no melhor detalhamento possível, considerado o escopo da pesquisa. Desse modo, introduzem-se diversas limitações que geraram incertezas. As principais limitações obtidas durante a pesquisa foram:

- As curvas IDF utilizadas na pesquisa foram concebidas em relação ao histórico de precipitação das cidades. Conforme discutido, espera-se que a intensidade

pluviométrica e o número de eventos extremos de precipitação aumentem nos próximos anos;

- O modelo de normalização e ponderação utilizado foi o método World I/A indicado pelo método ReCiPe 2016, dentro do OpenLCA. Esse método possui fatores de normalização e ponderação referentes aos impactos de referência mundiais, podendo não representar diretamente a realidade brasileira. Também estão referenciados a estudos de 2010, apresentando diferenciação temporal em relação ao ano da pesquisa;
- O banco de dados utilizado, Ecoinvent 3.8, apresentou na matriz de qualidade representação temporal ruim dos processos utilizados, com mais de quinze anos. A dificuldade de obter dados recentes, menos de dez anos por exemplo, é exemplificada pela quantidade de processos utilizados na pesquisa, de aproximadamente 13.000.
- A geração de cenários simulados foi realizada de modo a responder as perguntas da pesquisa e conceber diferentes arranjos de captação de água pluvial. Porém, para tal, foram fixados parâmetros como o tamanho de reservatório inferior. A fixação de alguns parâmetros de projeto gera incertezas nos resultados finais, e tais parâmetros podem ser melhor avaliados em novos estudos com abordagem probabilística e otimização ambiental do sistema de captação.
- O custo computacional para simulação de Montecarlo agregado às condições de *software* e *hardware* limitaram o número de simulações realizadas na pesquisa.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros têm-se:

- Comparar ambientalmente sistemas de pavimentação permeável e outros tipos de SUDS (telhados verdes, tratamento biológico, entre outros) por meio do fluxograma de ACV proposto nesta pesquisa;
- Aplicar o método proposto neste trabalho para uso de pavimentação permeável em vias de alto tráfego, bem como as demais contribuições benéficas indicadas para o sistema de pavimentação;
- Explorar a comparação ambiental da fase de uso em relação aos benefícios qualitativos com mais parâmetros e suas especificidades;
- Explorar as variáveis de incerteza indicadas neste trabalho, por meio de análises estatísticas que produzam conclusões de maior confiabilidade.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **Guide for Design of Pavement Structures**. 3rd Editio. Washington, DC: American Association of State Highways e Transportation Officials, 1993. P. 1–624.

ABAS, Pg Emeroylariffion; MAHLIA, T. M. I. Techno-economic and sensitivity analysis of rainwater harvesting system as alternative water source. **Sustainability (Switzerland)**, MDPI AG, v. 11, n. 8, abr. 2019. DOI: 10.3390/su11082365.

ABNT. **NBR 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a. P. 30.

ABNT. **NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009b. P. 52.

ABNT. **NBR 15527: Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019a. P. 14.

ABNT. **NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021. P. 98.

ABNT. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto — Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015. P. 31.

ABNT. **NBR 16783: Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações**. Rio de Janeiro, 2019b. P. 25.

ABNT. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013. P. 21.

ACIOLI, Laura Albuquerque. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 2005. P. 145. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5843>.

ADASA. **Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal**. Edição: Luiz Fernando Orsini Yazaki, Marcos Helano Fernandes Montenegro e Jeferson da Costa. 1. ed. Distrito Federal: ADASA, 2018. P. 329. ISBN 978-85-53093-01-4.

- AGOSTINHO, Mariele De Souza Parra; POLETO, Cristiano. Sustainable Urban Drainage Systems: devices (Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana: Dispositivos, in portuguese). **Holos Environment**, Lepidus Tecnologia, v. 12, n. 2, p. 121, dez. 2012. DOI: 10.14295/holos.v12i2.3054.
- AKBARI, Hashem; MENON, Surabi; ROSENFELD, Arthur. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO 2. **Climatic Change**, v. 94, p. 275–286, 3-4 jun. 2009. ISSN 01650009. DOI: 10.1007/s10584-008-9515-9.
- AKBARI, Hashem *et al.* Local climate change and urban heat island mitigation techniques - The state of the art. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 22, n. 1, p. 1–16, 2016. DOI: 10.3846/13923730.2015.1111934.
- ALLEMAN, James; HEITZMAN, Michael. **Quantifying Pavement Albedo**. Ames, IA, 2019. P. 1–232.
- ALMAZROUI, Mansour; ISLAM, M. Nazrul; BALKHAIR, Khaled S.; ŞEN, Zekâi; MASOOD, Amjad. Rainwater harvesting possibility under climate change: A basin-scale case study over western province of Saudi Arabia. **Atmospheric Research**, v. 189, p. 11–23, 2017. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.01.004.
- ALMEIDA, Artur R.; ALVARENGA, Rodrigo A.F.; SARTOR, Lucas B.; SIMIONI, Flávio J. Mitigating environmental impacts using Life Cycle Assessment in Brazilian companies: A stakeholders' perspective. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 236, p. 291–300, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.01.094.
- ALMEIDA, Lutiane Queiroz de; WELLE, Torsten; BIRKMANN, Jörn. Disaster risk indicators in Brazil: A proposal based on the world risk index. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, Elsevier, v. 17, p. 251–272, 2016. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2016.04.007.
- ANAND, C.; APUL, D. S. Economic and environmental analysis of standard, high efficiency, rainwater flushed, and composting toilets. **Journal of Environmental Management**, J Environ Manage, v. 92, n. 3, p. 419–428, mar. 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.08.005.
- ANGRILL, Sara; FARRENY, Ramon; GASOL, Carles M.; GABARRELL, Xavier; VIÑOLAS, Bernat; JOSA, Alejandro; RIERADEVALL, Joan. Environmental analysis of rainwater harvesting infrastructures in diffuse and compact urban models of

Mediterranean climate. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 1, p. 25–42, jan. 2012. DOI: 10.1007/s11367-011-0330-6.

ANGRILL, Sara; SEGURA-CASTILLO, Luis; PETIT-BOIX, Anna; RIERADEVALL, Joan; GABARRELL, Xavier; JOSA, Alejandro. Environmental performance of rainwater harvesting strategies in Mediterranean buildings. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer Verlag, v. 22, n. 3, p. 398–409, mar. 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1174-x.

ANTUNES, Lucas Niehuns; GHISI, EneDIR; SEVERIS, Roni Matheus. Environmental assessment of a permeable pavement system used to harvest stormwater for non-potable water uses in a building. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 746, p. 141087, dez. 2020a. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141087.

ANTUNES, Lucas Niehuns; GHISI, EneDIR; THIVES, Liseane Padilha. Permeable pavements life cycle assessment: A literature review. **Water (Switzerland)**, MDPI AG, v. 10, n. 11, nov. 2018. DOI: 10.3390/w10111575.

ANTUNES, Lucas Niehuns; MARTINS VAZ, Igor Catão; GHISI, EneDIR; THIVES, Liseane Padilha. Life cycle assessment of pervious pavements: Systematic review and novel ideas of analysis. **Em prelo**, Em prelo, v. 1, p. 34, dez. 2022.

ANTUNES, Lucas Niehuns; SYDNEY, Calum; GHISI, EneDIR; PHOENIX, Vernon R.; THIVES, Liseane Padilha; WHITE, Christopher; GARCIA, Emmanuelle Stefânia Holdefer. Reduction of environmental impacts due to using permeable pavements to harvest stormwater. **Water (Switzerland)**, MDPI AG, v. 12, n. 10, p. 1–15, out. 2020b. DOI: 10.3390/w12102840.

ANTUNES, Lucas Niehuns; THIVES, Liseane Padilha; GHISI, EneDIR. Potential for potable water savings in buildings by using stormwater harvested from porous pavements. **Water (Switzerland)**, MDPI AG, v. 8, n. 4, p. 110, mar. 2016. DOI: 10.3390/w8040110.

ASHLEY, Richard; LUNDY, Lian; WARD, Sarah; SHAFFER, Paul; WALKER, Louise; MORGAN, Celeste; SAUL, Adrian; WONG, Tony; MOORE, Sarah. Water-sensitive urban design: Opportunities for the UK. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer**, v. 166, n. 2, p. 65–76, 2013. DOI: 10.1680/muen.12.00046.

AZEVEDO, Leticia Dalpaz de. **Comparação da avaliação do ciclo de vida e da avaliação do ciclo de vida energético como técnicas de tomada de decisão na construção de habitações de interesse social**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, 2021. P. 225.

BACK, Álvaro; BONETTI, Anderson. Chuva de projeto para instalações prediais de águas pluviais de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 260–267, 2014. ISSN 2318-0331. DOI: 10.21168/rbrh.v19n4.p260-267.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto permeáveis - uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. P. 176.

BBC. **China floods: 12 dead in Zhengzhou train and thousands evacuated in Henan - BBC News**. China: [s.n.], jul. 2021a. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-asia-china-57861067>.

BBC. **Germany floods: Dozens killed after record rain in Germany and Belgium**. Germany: [s.n.], jul. 2021b. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-europe-57846200>.

BEDUSCHI, Luis. **Manual de drenagem - Caderno 1 - Redes de microdrenagem**. Blumenau, Santa Catarina, Brasil.: Prefeitura de Blumenau, 2020.

BELL, Michelle L.; O'NEILL, Marie S.; RANJIT, Nalini; BORJA-ABURTO, Victor H.; CIFUENTES, Luis A.; GOUVEIA, Nelson C. Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: A case-crossover study in São Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. **International Journal of Epidemiology**, v. 37, n. 4, p. 796–804, 2008. DOI: 10.1093/ije/dyn094.

BENINI, Sandra. **Infraestrutura verde como prática sustentável para subsidiar a elaboração de planos de drenagem urbana: estudo de caso da cidade de Tupã/SP**. 2015. F. 218. Tese (Doutorado) – UNESP, Tese de Doutorado.

BHATT, Akul; BRADFORD, Andrea; ABBASSI, Bassim E. Cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) of low-impact-development (LID) technologies in southern Ontario. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 231, October 2018, p. 98–109, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.033.

BIZARRO, Diana Eliza Godoi; STEINMANN, Zoran; NIEUWENHUIJSE, Isabel; KEIJZER, Elisabeth; HAUCK, Mara. Potential carbon footprint reduction for reclaimed asphalt pavement innovations: Lca methodology, best available technology, and near-future reduction potential. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 3, p. 1–20, 2021. ISSN 20711050. DOI: 10.3390/su13031382.

BJÖRKLUND, Anna E. Survey of approaches to improve reliability in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 2, p. 64–72, 2002. ISSN 09483349. DOI: 10.1007/BF02978849.

BLENKINSOP, Stephen; MUNIZ, Lincoln; SMITH, Adam J. P. Climate change increases extreme rainfall and the chance of floods. **Science Brief Review**, v. 2021, June, p. 1–5, 2021. Disponível em:
<https://zenodo.org/record/4779119#.YMum52hKiU1>.

BROWN, R. R.; KEATH, N.; WONG, T. H.F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 847–855, 2009. DOI: 10.2166/wst.2009.029.

BUENO, Cristiane; HAUSCHILD, Michael Zwicky; ROSSIGNOLO, João Adriano; OMETTO, Aldo Roberto; MENDES, Natália Crespo. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: A case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208–2220, 2016. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.006.

CAMPISANO, Alberto *et al.* Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. **Water Research**, Elsevier Ltd, v. 115, p. 195–209, 2017. ISSN 18792448. DOI: 10.1016/j.watres.2017.02.056.

CAUDURO, Flávia; MÜLLER, Christiane Ribeiro; ROSA, Gustavo Guimarães. Proposta de drenagem sustentável para uma municipalidade de pequeno porte – Estudo de caso. **Águas subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas**, p. 1–8, 2019.

CHEN, Huo Po. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. **Chinese Science Bulletin**, v. 58, n. 12, p. 1462–1472, 2013. DOI: 10.1007/s11434-012-5612-2.

- CHEN, Jian Shihuh; YANG, Chin Hung; LEE, Cheng Te. Field evaluation of porous asphalt course for life-cycle cost analysis. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 221, p. 20–26, out. 2019. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.072.
- CHEN, Xiaodan; WANG, Hao. Life-cycle assessment and multi-criteria performance evaluation of pervious concrete pavement with fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier B.V., v. 177, n. 105969, 2022. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105969.
- COSTA, Carlos Eduardo Aguiar de Souza; BLANCO, Claudio José Cavalcante; OLIVEIRA-JÚNIOR, José Francisco de. Idf curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. **Journal of Water and Climate Change**, IWA Publishing, v. 11, n. 3, p. 760–770, set. 2020. ISSN 24089354. DOI: 10.2166/wcc.2019.202.
- COTTERILL, Sarah; BRACKEN, Louise J. Assessing the effectiveness of sustainable drainage systems (SuDS): Interventions, impacts and challenges. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 11, p. 1–21, 2020. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w12113160.
- CRUZ, Marcus Aurélio Soares; TUCCI, Carlos E. M. Avaliação dos Cenários de Planejamento na Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 59–71, 2008. ISSN 2318-0331. DOI: 10.21168/rbrh.v13n3.p59-71.
- CUREAU, Roberta Jacoby; GHISI, Enedir. Electricity savings by reducing water consumption in a whole city: A case study in Joinville, Southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 261, p. 121194, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121194.
- DEUMLICH, Detlef; GERICKE, Andreas. Frequency trend analysis of heavy rainfall days for Germany. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 7, p. 1–29, 2020. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w12071950.
- DEVKOTA, Jay; SCHLACHTER, Hannah; APUL, Defne. Life cycle based evaluation of harvested rainwater use in toilets and for irrigation. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 95, p. 311–321, mai. 2015. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.021.

DIETZ, Michael E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 186, n. 1-4, p. 351–363, 2007. ISSN 00496979. DOI: 10.1007/s11270-007-9484-z.

DO CARMO, Roberto Luiz; OLIVEIRA OJIMA, Andréa Leda Ramos de; OJIMA, Ricardo; DO NASCIMENTO, Thais Tartalha. Virtual water, scarcity and management: Brazil as a large water exporter. **Ambiente e Sociedade**, v. 10, n. 2, p. 83–96, 2007. ISSN 1414753X. DOI: 10.1590/s1414-753x2007000200006.

DORNELLES, Lorenzo. **Como Florianópolis pretende chegar a ‘Lixo Zero’ até 2030**. Florianópolis: ND+, 2021. Disponível em: <https://ndmais.com.br/meio-ambiente/como-florianopolis-pretende-chegar-a-lixo-zero-ate-2030/>.

DPAE, (Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia). **Projetos arquitetônicos e hidrossanitários das instalações da UFSC**. Florianópolis: UFSC, 2021. Disponível em: <https://dpae.ufsc.br/>.

ELLINGBOE, Ethan; AREHART, Jay H.; SRUBAR, Wil V. On the theoretical CO2 sequestration potential of pervious concrete. **Infrastructures**, v. 4, n. 1, 2019. ISSN 24123811. DOI: 10.3390/infrastructures4010012.

ELSEVIER. **Scopus | O maior banco de dados da literatura revisada por pares | Elsevier**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>.

FARAGÒ, Maria; BRUDLER, Sarah; GODSKESEN, Berit; RYGAARD, Martin. An eco-efficiency evaluation of community-scale rainwater and stormwater harvesting in Aarhus, Denmark. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 219, p. 601–612, mai. 2019. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.265.

FATHOLLAHI, Alireza; COUPE, Stephen J. Life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of road drainage systems for sustainability evaluation: Quantifying the contribution of different life cycle phases. **Science of the Total Environment**, The Authors, v. 776, p. 145937, 2021. ISSN 18791026. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145937.

FLETCHER, Tim D. *et al.* SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, Taylor e

Francis Ltd., v. 12, n. 7, p. 525–542, out. 2015. ISSN 17449006. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314.

FONSECA, Marisa Gesteira; ALVES, Lincoln Muniz; AGUIAR, Ana Paula Dutra; ARAI, Egidio; ANDERSON, Liana Oighenstein; ROSAN, Thais Michele; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; ARAGÃO, Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de. Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2931–2946, 2019. ISSN 13652486. DOI: 10.1111/gcb.14709.

FREITAS, Douglas Ancelmo; GHISI, E. Economic feasibility analysis of rainwater harvesting: a case study in Imbituba, Brazil. **Urban Water Journal**, Taylor & Francis, v. 17, n. 10, p. 905–911, 2020. ISSN 17449006. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1846062.

GARCIA, Emmanuelle S.H.; THIVES, Liseane Padilha; GHISI, EneDir; ANTUNES, Lucas Niehuns. Analysis of permeability reduction in drainage asphalt mixtures due to decrease in void volume. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 248, p. 119292, 2020. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119292.

GARCÍA-MONTOYA, Mariana; SENGUPTA, Debalina; NÁPOLES-RIVERA, Fabricio; PONCE-ORTEGA, José María; EL-HALWAGI, Mahmoud M. Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 130, p. 82–91, set. 2016. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.06.109.

GASPARRINI, Antonio *et al.* Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. **The Lancet Planetary Health**, v. 1, n. 9, e360–e367, 2017. ISSN 25425196. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30156-0.

GASQUES, A.C.F.; OKAWA, C.M.P.; NETO, G.D.A.; MIOTTO, J.L.; CASTRO, T.R. Impactos ambientais dos materiais da construção civil: Breve revisão teórica. **Revista Tecnológica**, v. 23, n. 1, p. 13–24, 2014. ISSN 2447-2476. DOI: 10.4025/revtecnol.v23i1.23375.

GHIMIRE, Santosh R.; JOHNSTON, John M.; GARLAND, Jay; EDELEN, Ashley; MA, Xin (Cissy); JAHNE, Michael. Life cycle assessment of a rainwater harvesting system compared with an AC condensate harvesting system. **Resources**,

Conservation and Recycling, Elsevier B.V., v. 146, p. 536–548, jul. 2019. ISSN 18790658. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.043.

GHIMIRE, Santosh R.; JOHNSTON, John M.; INGWERSEN, Wesley W.; SOJKA, Sarah. Life cycle assessment of a commercial rainwater harvesting system compared with a municipal water supply system. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 151, p. 74–86, mai. 2017. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.025.

GHISI, E.; CORDOVA, Marcelo Marcel. **Netuno 4, programa computacional**. Florianópolis: LABEEE, 2014. Disponível em: [http://www.labee.ufsc.br/..](http://www.labee.ufsc.br/)

GHISI, EneDir; BELOTTO, Thiago; THIVES, Liseane Padilha. The use of permeable interlocking concrete pavement to filter stormwater for non-potable uses in buildings. **Water (Switzerland)**, MDPI AG, v. 12, n. 7, p. 1–13, jul. 2020. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w12072045. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/7/2045>.

GHISI, EneDir; MONTIBELLER, Andreza; SCHMIDT, Richard W. Potential for potable water savings by using rainwater: An analysis over 62 cities in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 204–210, 2006. ISSN 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.01.014.

GLICK, Scott; SHULER, Scott; GUGGEMOS, Angela Acree. Life Cycle Analysis for Sustainable Development: A Case Study of Parking Lot Pavements. **International Journal of Construction Education and Research**, Taylor & Francis Group, v. 9, n. 3, p. 226–236, jul. 2013. ISSN 15578771. DOI: 10.1080/15578771.2012.714443.

GODSKESEN, B.; HAUSCHILD, M.; RYGAARD, M.; ZAMBRANO, K.; ALBRECHTSEN, H. J. Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of water supply technologies. **Water Research**, Elsevier Ltd, v. 47, n. 7, p. 2363–2374, mai. 2013. ISSN 18792448. DOI: 10.1016/j.watres.2013.02.005.

GOEDKOOP, Mark; HEIJUNGS, Reinout; HUIJBREGTS, Mark; SCHRYVER, An De; STRUIJS, Jaap; ZELM, Rosalie Van. **ReCiPe 2008**. [S.l.: s.n.], 2009. P. 1–44. Disponível em: http://www.pre-sustainability.com/download/misc/ReCiPe_main_report_final_27-02-2009_web.pdf.

GONI, Feybi Ariani; SHUKOR, Syaimak Abdul; MUKHTAR, Muriati; SAHRAN, Shahnorbanun. Environmental sustainability: Research growth and trends. **Advanced Science Letters**, v. 21, n. 2, p. 192–195, 2015. ISSN 19367317. DOI: 10.1166/asl.2015.5850.

GOSLING, Simon N.; ARNELL, Nigel W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. **Climatic Change**, v. 134, n. 3, p. 371–385, 2016. ISSN 15731480. DOI: 10.1007/s10584-013-0853-x.

GOTARDO, Rafael; PIAZZA, Gustavo Antonio; TORRES, Edson; SEVERO, Dirceu Luis; KAUFMANN, Vander. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de Santa Catarina. **Geosul**, v. 33, n. 67, p. 253–276, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n67p253>.

GRAEL, Paulo F.F.; OLIVEIRA, Luiza S.B.L.; OLIVEIRA, Deborah S.B.L.; BEZERRA, Barbara S. Life cycle inventory and impact assessment for an asphalt pavement road construction—a case study in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer Berlin Heidelberg, v. 26, n. 2, p. 402–416, 2021. ISSN 16147502. DOI: 10.1007/s11367-020-01842-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01842-5>.

GREENDELTA. **openLCA.org**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.openlca.org/>.

GUAN, Xin; WANG, Jiayu; XIAO, Feipeng. Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 303, p. 127022, 2021. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127022.

GUANAIS, Ana Luiza Rezende; COHIM, Eduardo Borges; MEDEIROS, Diego Lima. Avaliação energética de um sistema integrado de abastecimento de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 22, p. 1187–1196, 6 nov. 2017. ISSN 14134152. DOI: 10.1590/s1413-41522017146180.

GUINÉE, Jeroen B.; HEIJUNGS, Reinout; HUPPES, Gjalt; ZAMAGNI, Alessandra; MASONI, Paolo; BUONAMICI, Roberto; EKVALL, Tomas; RYDBERG, Tomas. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 1, p. 90–96, 2011. DOI: 10.4324/9781315778730.

GUO, Yuming *et al.* Temperature variability and mortality: A multi-country study. **Environmental Health Perspectives**, v. 124, n. 10, p. 1554–1559, 2016. ISSN 15529924. DOI: 10.1289/EHP149.

GUPTA, Anik; SLEBI-ACEVEDO, Carlos J.; LIZASOAIN-ARTEAGA, Esther; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, Jorge; CASTRO-FRESNO, Daniel. Multi-criteria selection of additives in porous asphalt mixtures using mechanical, hydraulic, economic, and environmental indicators. **Sustainability (Switzerland)**, MDPI AG, v. 13, n. 4, p. 1–21, fev. 2021. ISSN 20711050. DOI: 10.3390/su13042146.

HAJANI, Evan; RAHMAN, Ataur. Rainwater utilization from roof catchments in arid regions: A case study for Australia. **Journal of Arid Environments**, Academic Press, v. 111, p. 35–41, 2014. ISSN 1095922X. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.07.007.

HAMMES, Gabriela; THIVES, Liseane Padilha; GHISI, Enedir. Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 222, May, p. 338–347, set. 2018. ISSN 10958630. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.05.094.

HAQUE, Md Mahmudul; RAHMAN, Ataur; SAMALI, Bijan. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 137, p. 60–69, 2016. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.038.

HENGEN, Tyler J.; SIEVERDING, Heidi L.; STONE, James J. Lifecycle Assessment Analysis of Engineered Stormwater Control Methods Common to Urban Watersheds. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 7, p. 04016016, 2016. ISSN 0733-9496. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000647.

HEROLD, N.; EKSTRÖM, M.; KALA, J.; GOLDIE, J.; EVANS, J. P. Australian climate extremes in the 21st century according to a regional climate model ensemble: Implications for health and agriculture. **Weather and Climate Extremes**, v. 20, April, p. 54–68, 2018. ISSN 22120947. DOI: 10.1016/j.wace.2018.01.001.

HOFMAN-CARIS, Roberta; BERTELKAMP, Cheryl; WAAL, Luuk de; BRAND, Tessa van den; HOFMAN, Jan; AA, René van der; HOEK, Jan Peter van der. Rainwater harvesting for drinkingwater production: A sustainable and cost-effective solution in The Netherlands? **Water (Switzerland)**, MDPI AG, v. 11, n. 3, mar. 2019. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w11030511.

HUIJBREGTS, Mark A.J.; STEINMANN, Zoran J.N.; ELSHOUT, Pieter M.F.; STAM, Gea; VERONES, Francesca; VIEIRA, Marisa; ZIJP, Michiel; HOLLANDER, Anne; ZELM, Rosalie van. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **International Journal of Life Cycle Assessment**, The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, n. 2, p. 138–147, 2017. ISSN 16147502. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.

HUNG, Annie; LI, Loretta Y.; SWEI, Omar. Evaluation of permeable highway pavements via an integrated life-cycle model. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 314, November 2020, p. 128043, set. 2021. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128043.

ICPI. **ICPI's Permeable Design Pro - Software for Permeable Interlocking Concrete Pavement Design**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <http://www.permeabledesignpro.com/>.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades@**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. v. 18. [S.l.], 2021. P. 433–440. DOI: 10.1260/095830507781076194.

ISTCHUK, Rodrigo Novais. **Análise de sensibilidade das variáveis de projeto sobre o desempenho de sistemas de aproveitamento de água pluvial em novas edificações residenciais unifamiliares**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021. P. 264.

JING, Xueer; ZHANG, Shouhong; ZHANG, Jianjun; WANG, Yunqi Yujie; WANG, Yunqi Yujie. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 126, July, p. 74–85, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.07.027.

JUNG, M.; KIM, H.; MALLARI, K. J.B.; PAK, G.; YOON, J. Analysis of effects of climate change on runoff in an urban drainage system: A case study from Seoul, Korea. **Water Science and Technology**, v. 71, n. 5, p. 653–660, 2015. ISSN 02731223. DOI: 10.2166/wst.2014.341.

KAZEMI, Fatemeh; HILL, Kelly. Effect of permeable pavement basecourse aggregates on stormwater quality for irrigation reuse. **Ecological Engineering**, Elsevier B.V., v. 77, p. 189–195, abr. 2015. ISSN 09258574. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.020.

KINGSBOROUGH, Ashley; BORGOMEIO, Edoardo; HALL, Jim W. Adaptation pathways in practice: Mapping options and trade-offs for London's water resources. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier B.V., v. 27, p. 386–397, 2016. ISSN 22106707. DOI: 10.1016/j.scs.2016.08.013.

KNABBEN, Ramon Mendes; TRICHÊS, Glicério; GERGES, Samir N.Y.; VERGARA, Erasmo F. Evaluation of sound absorption capacity of asphalt mixtures. **Applied Acoustics**, Elsevier Ltd, v. 114, p. 266–274, dez. 2016. ISSN 1872910X. DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.08.008.

KOLOKOTRONI, Maria; GIRIDHARAN, Renganathan. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 82, n. 11, p. 986–998, 2008. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2008.05.004.

KOOP, S. H. A.; LEEUWEN, C. J. van. The challenges of water, waste and climate change in cities. **Environment, Development and Sustainability**, Springer Netherlands, v. 19, n. 2, p. 385–418, 2017. ISSN 15732975. DOI: 10.1007/s10668-016-9760-4.

LAM, Ka Leung; HOEK, Jan Peter Van Der. Low-Carbon Urban Water Systems: Opportunities beyond Water and Wastewater Utilities? **Environmental Science and Technology**, v. 54, n. 23, p. 14854–14861, 2020. ISSN 15205851. DOI: 10.1021/acs.est.0c05385.

LANDI, Daniele; MARCONI, Marco; BOCCI, Edoardo; GERMANI, Michele. Comparative life cycle assessment of standard, cellulose-reinforced and end of life tires fiber-reinforced hot mix asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 248, p. 119295, 2020. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119295.

LASCHEFSKI, Klemens. 500 Anos Em Busca Da Sustentabilidade Urbana. **Cadernos Metrópole.**, v. 15, n. 29, p. 143–169, 2013. ISSN 2236-9996. DOI: 10.1590/15820.

LEEUWEN, Cornelis Johannes van. Water governance and the quality of water services in the city of Melbourne. **Urban Water Journal**, Taylor & Francis, v. 14, n. 3, p. 247–254, 2017. ISSN 17449006. DOI: 10.1080/1573062X.2015.1086008.

LEONG, Janet Yip Cheng; BALAN, Poovarasi; CHONG, Meng Nan; POH, Phaik Eong. Life-cycle assessment and life-cycle cost analysis of decentralised rainwater harvesting, greywater recycling and hybrid rainwater-greywater systems. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 229, p. 1211–1224, ago. 2019. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.046.

LI, Yi; HUANG, Youyi; YE, Quanliang; ZHANG, Wenlong; MENG, Fangang; ZHANG, Shanxue. Multi-objective optimization integrated with life cycle assessment for rainwater harvesting systems. **Journal of Hydrology**, Elsevier B.V., v. 558, p. 659–666, mar. 2018. ISSN 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydro1.2018.02.007.

LI, Yu; HUANG, Jeanne J.; HU, Maochuan; YANG, Hong; TANAKA, Kenji. Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost. **Journal of Flood Risk Management**, Blackwell Publishing Inc., v. 13, n. 3, p. 1–15, set. 2020. ISSN 1753318X. DOI: 10.1111/jfr3.12625.

LIU, Jiawen; LI, Hui; WANG, Yu; ZHANG, Hengji. Integrated life cycle assessment of permeable pavement: Model development and case study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 85, n. 102381, ago. 2020. ISSN 13619209. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102381.

LOURENÇO, Rossana Ramos de Abreu. **Sistemas urbanos de drenagem sustentáveis**. Coimbra: Instituto Politécnico de Coimbra, Dissertação de Mestrado, 2014. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/14071>.

LU, Guoyang; WANG, Yuhong; LI, Hui; WANG, Dawei; OESER, Markus. The environmental impact evaluation on the application of permeable pavement based on life cycle analysis. **International Journal of Transportation Science and Technology**, Tongji University, v. 8, n. 4, p. 351–357, dez. 2019. ISSN 20460449. DOI: 10.1016/j.ijtst.2019.05.006.

MACINTOSH-WATSON, Mark; MORRELL, David; URDING, Tara; GORST, Nick. **Design & Construction of Concrete Block**. Leicester, 2018. P. 84. Disponível em: www.paving.org.uk.

MAIOLO, M.; CARINI, M.; CAPANO, G.; PIRO, P. Synthetic sustainability index (SSI) based on life cycle assessment approach of low impact development in the Mediterranean area. **Cogent Engineering**, Cogent, v. 4, n. 1, 2017. ISSN 23311916. DOI: 10.1080/23311916.2017.1410272.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in south america as derived from the precis regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 15, p. 2241–2255, 2009. ISSN 08998418. DOI: 10.1002/joc.1863.

MARENGO, José A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25, 2014. ISSN 0103-9989. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32.

MARENGO, Jose A.; VALVERDE, Maria C.; OBREGON, Guillermo O. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. **Climate Research**, v. 57, n. 1, p. 61–72, 2013. ISSN 0936577X. DOI: 10.3354/cr01160.

MARINOSKI, A. K.; GHISI, E. Assessment of the environmental impact and investment feasibility analysis of rainwater use in houses. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, WITPress, v. 148, p. 391–402, 2011. ISSN 17433541. DOI: 10.2495/RAV110361.

MARINOSKI, A. K.; GHISI, E. Environmental performance of hybrid rainwater-greywater systems in residential buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier B.V., v. 144, p. 100–114, mai. 2019. ISSN 18790658. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.035.

MARK, O.; JØRGENSEN, C.; HAMMOND, M.; KHAN, D.; TJENER, R.; ERICHSEN, A.; HELWIGH, B. A new methodology for modelling of health risk from urban flooding exemplified by cholera – case Dhaka, Bangladesh. *In: JOURNAL of Flood Risk Management*. [S.l.]: Blackwell Publishing Inc., jan. 2018. s28–s42. DOI: 10.1111/jfr3.12182.

MARTINS VAZ, Igor Catão; ANTUNES, Lucas Niehuns; GHISI, EneDir; THIVES, Liseane Padilha. Permeable Pavements as a Means to Save Water in

Buildings: State of the Art in Brazil. **Sci**, v. 3, n. 4, p. 36, 2021a. DOI: 10.3390/sci3040036.

MARTINS VAZ, Igor Catão; GHISI, Enedir; THIVES, Liseane Padilha. Life cycle energy assessment and economic feasibility of stormwater harvested from pervious pavements. **Water Research**, Elsevier Ltd, v. 170, p. 115322, mar. 2020. ISSN 18792448. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115322.

MARTINS VAZ, Igor Catão; GHISI, Enedir; THIVES, Liseane Padilha. Stormwater Harvested from Permeable Pavements as a Means to Save Potable Water in Buildings. **Water**, v. 13, n. 14, 2021b. ISSN 2073-4441. DOI: 10.3390/w13141896.

MAYKOT, Jéssica Kuntz. **Caracterização do first flush proveniente de cobertura de fibrocimento localizada em Florianópolis**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021. P. 319.

MBANASO, F. U.; NNADI, E. O.; COUPE, S. J.; CHARLESWORTH, S. M. Stormwater harvesting from landscaped areas: effect of herbicide application on water quality and usage. **Environmental Science and Pollution Research**, Environmental Science e Pollution Research, v. 23, n. 16, p. 15970–15982, 2016. DOI: 10.1007/s11356-016-6729-7.

MEKONNEN, Mesfin M.; HOEKSTRA, Arjen Y. Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. **Science Advances**, v. 2, n. 2, 2016. ISSN 23752548. DOI: 10.1126/sciadv.1500323.

MELVILLE-SHREEVE, Peter; WARD, Sarah; BUTLER, David. Rainwater harvesting typologies for UK houses: A multi criteria analysis of system configurations. **Water (Switzerland)**, v. 8, n. 4, 2016. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w8040129.

MENDES, Flávio Henrique; ROMERO, Hugo; FERREIRA DA SILVA FILHO, Demóstenes. Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. **Revista de geografía Norte Grande**, v. 210, n. 77, p. 191–210, 2020. DOI: 10.4067/s0718-34022020000300191.

MILLINGTON, Nate. Producing water scarcity in São Paulo, Brazil: The 2014-2015 water crisis and the binding politics of infrastructure. **Political Geography**, Elsevier, v. 65, April, p. 26–34, 2018. ISSN 09626298. DOI: 10.1016/j.polgeo.2018.04.007.

MONTEIRO, Mikael; BRAGA, Etianne. Análise da equação IDF de Manaus. **V Seminário internacional em ciências do ambiente e sustentabilidade na Amazônia**, v. 5, Gt 12, p. 1–10, 2018.

MORALES-PINZÓN, Tito; RIERADEVALL, Joan; GASOL, Carles M.; GABARRELL, Xavier; MORALES-PINZ, Tito. Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 87, n. 1, p. 613–626, 2015. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.021.

MULLANEY, Jennifer; LUCKE, Terry. Practical review of pervious pavement designs. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 42, n. 2, p. 111–124, fev. 2014. ISSN 18630650. DOI: 10.1002/c1en.201300118.

NASCIMENTO, Adélia Santana; NUNES, Aline de Araújo; ABADE, Dayane Santos Oliveira; CASTRO, Gabriela Alves; OLIVEIRA, Juliana Gonçalves; CASTRO, Kelton Douglas Ribeiro; TEODORO, Marcella Rosa. Análise de chuvas intensas para o município de Belo Horizonte. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 32184–32218, 2020. ISSN 25258761. DOI: 10.34117/bjdv6n5-605.

NAZER, Dima W.; SIEBEL, Maarten A.; ZAAG, Pieter van der; MIMI, Ziad; GIJZEN, Huub J. A Financial, Environmental and Social Evaluation of Domestic Water Management Options in the West Bank, Palestine. **Water Resources Management**, v. 24, n. 15, p. 4445–4467, dez. 2010. ISSN 09204741. DOI: 10.1007/s11269-010-9667-z.

NETTO, Sebastião Vieira de Freitas; SOBRAL, Marcos Felipe Falcão; RIBEIRO, Ana Regina Bezerra; SOARES, Gleibson Robert da Luz. Concepts and forms of greenwashing: a systematic review. **Environmental Sciences Europe**, Springer Berlin Heidelberg, v. 32, n. 1, 2020. ISSN 21904715. DOI: 10.1186/s12302-020-0300-3.

NEWMAN, Alan P.; NNADI, Ernest O.; MBANASO, Fredrick U. Evaluation of pervious and macro-pervious pavements as harvesting systems for localized landscape and horticultural irrigation. **World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems - Proceedings of the 2015 World Environmental and Water Resources Congress**, p. 2004–2013, 2015. DOI: 10.1061/9780784479162.197.

NGUYEN, Thu Thuy; NGO, Huu Hao; GUO, Wenshan; WANG, Xiaochang C.; REN, Nanqi; LI, Guibai; DING, Jie; LIANG, Heng. Implementation of a specific urban water management - Sponge City. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 652, p. 147–162, 2019. ISSN 18791026. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.168.

NNADI, Ernest O.; NEWMAN, Alan P.; COUPE, Stephen J.; MBANASO, Fredrick U. Stormwater harvesting for irrigation purposes: An investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system. **Journal of Environmental Management**, Elsevier Ltd, v. 147, p. 246–256, 2015. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.08.020.

NUNES CARVALHO, Taís Maria; SOUZA FILHO, Francisco De Assis de; MEDEIROS DE SABÓIA, Marcos Abílio. Performance of rainwater tanks for runoff reduction under climate change scenarios: a case study in Brazil. **Urban Water Journal**, Taylor & Francis, v. 17, n. 10, p. 912–922, 2020. ISSN 17449006. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1846063.

OLAWUMI, Timothy O.; CHAN, Daniel W.M. A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 183, p. 231–250, 2018. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.162.

ORIMOLOYE, Israel Ropo; MAZINYO, Sonwabo Perez; KALUMBA, Ahmed Mukalazi; EKUNDAYO, Olapeju Yewande; NEL, Werner. Implications of climate variability and change on urban and human health: A review. **Cities**, Elsevier, v. 91, January, p. 213–223, 2019. ISSN 02642751. DOI: 10.1016/j.cities.2019.01.009.

PAULA JUNIOR, Adilson C.; JACINTO, Cláudia; OLIVEIRA, Thaís M.; POLISSENI, Antonio E.; BRUM, Fabio M.; TEIXEIRA, Elisabete R.; MATEUS, Ricardo. Characterisation and life cycle assessment of pervious concrete with recycled concrete aggregates. **Crystals**, MDPI AG, v. 11, n. 2, p. 1–30, fev. 2021. ISSN 20734352. DOI: 10.3390/cryst11020209.

PECEÑO, Begoña; LEIVA, Carlos; ALONSO-FARIÑAS, Bernabé; GALLEGO-SCHMID, Alejandro. Is recycling always the best option? Environmental assessment of recycling of seashell as aggregates in noise barriers. **Processes**, v. 8, n. 7, 2020. ISSN 22279717. DOI: 10.3390/PR8070776.

PENG, Shushi; PIAO, Shilong; CIAIS, Philippe; FRIEDLINGSTEIN, Pierre; OTTLE, Catherine; BRÉON, François Marie; NAN, Huijuan; ZHOU, Liming; MYNENI, Ranga B. Surface urban heat island across 419 global big cities. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 12, p. 6889–6890, 2012. ISSN 0013936X. DOI: 10.1021/es301811b.

PERALES-MOMPARLER, Sara; ANDRÉS-DOMÉNECH, Ignacio; HERNÁNDEZ-CRESPO, Carmen; VALLÉS-MORÁN, Francisco; MARTÍN, Miguel; ESCUDER-BUENO, Ignacio; ANDREU, Joaquín. The role of monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: a case study in the Valencian region, Spain. **Journal of Cleaner Production**, v. 163, s113–s124, 2017. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.153.

PERES, Leonardo de Faria; LUCENA, Andrews José de; ROTUNNO FILHO, Otto Corrêa; FRANÇA, José Ricardo de Almeida. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Elsevier, v. 64, August 2017, p. 104–116, 2018. ISSN 1872826X. DOI: 10.1016/j.jag.2017.08.012.

PETERSON, Lisa A.; AWERBUCH, Patricia M.; SPATARI, Sabrina. Environmental and economic implications of stormwater management alternatives in rural development. **Journal of Industrial Ecology**, p. 1–13, 2021. ISSN 15309290. DOI: 10.1111/jiec.13098.

PETIT-BOIX, Anna; DEVKOTA, Jay; PHILLIPS, Robert; VARGAS-PARRA, María Violeta; JOSA, Alejandro; GABARRELL, Xavier; RIERADEVALL, Joan; APUL, Defne. Life cycle and hydrologic modeling of rainwater harvesting in urban neighborhoods: Implications of urban form and water demand patterns in the US and Spain. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 621, p. 434–443, abr. 2018. ISSN 18791026. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.206.

PIACENTINI, Simone Maria; ROSSETTO, Rudy. Attitude and actual behaviour towards water-related green infrastructures and sustainable drainage systems in four north-western mediterranean regions of Italy and France. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 5, 2020. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w12051474.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 2011. P. 283.

PMSP. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; diretrizes para projetos**. [S.l.: s.n.], 2012. v. III, p. 128. ISBN 9788566381030.

RACOVICIANU, Alina I.; KARNEY, Bryan W. Life-Cycle Perspective on Residential Water Conservation Strategies. **Journal of Infrastructure Systems**, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 16, n. 1, p. 40–49, mar. 2010. ISSN 1076-0342. DOI: 10.1061/(asce)1076-0342(2010)16:1(40).

RAHMAN, Ataur; KEANE, Joseph; IMTEAZ, Monzur Alam. Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 61, p. 16–21, 2012. ISSN 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.12.002.

RAINMAP. **Análise de viabilidade para implantação de um sistema de aproveitamento de águas pluviais no Centro Tecnológico – CTC / UFSC**.

Florianópolis, 2017. P. 131. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/176033/ProjetoCTC-AnaliseViabilidade-F-20170522-DRIVE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

REBITZER, Gerald *et al.* Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004. ISSN 18736750. DOI: 10.1016/j.envint.2003.11.005.

REHAN, Talal; QI, Yan; WERNER, Anne. Life-cycle cost analysis for traditional and permeable pavements. *In*: CONSTRUCTION Research Congress 2018: Sustainable Design and Construction and Education - Selected Papers from the Construction Research Congress 2018. [S.l.]: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2018. P. 422–431. DOI: 10.1061/9780784481301.042.

RIBEIRO, Ana Kelly Marinoski. **Método para avaliação do impacto ambiental da implantação de sistemas integrados de aproveitamento de água pluvial e água cinza em residências unifamiliares a partir da análise do ciclo de vida**. 2015. F. 276. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, Israel; LIZASOAIN-ARTEAGA, Esther; LASTRA-GONZÁLEZ, Pedro; CASTRO-FRESNO, Daniel. Mechanical, environmental and economic feasibility of highly sustainable porous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 251, 2020. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118982.

ROWE, D.B.; GETTER, K.L. The role of extensive green roofs in sustainable development. **HortScience**, v. 41, n. 5, p. 1276–1285, 2006.

SÁNCHEZ, Jonathan Albo; RAMOS, Antonio Domínguez; BLANCO, María Margallo; ALONSO, Javier Pinedo. **Course on Life Cycle Assessment**. Cantabria: Unversidad de Cantabria, 2020. Disponível em: <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=282>.

SANJUÁN, Miguel Ángel; MORALES, Ángel; ZARAGOZA, Aniceto. Effect of precast concrete pavement albedo on the climate change mitigation in Spain. **Sustainability (Switzerland)**, MDPI, v. 13, 20 out. 2021. ISSN 20711050. DOI: 10.3390/su132011448.

SANTAMOURIS, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 26, p. 224–240, 2013. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.047.

SANTAMOURIS, M.; DING, L.; FIORITO, F.; OLDFIELD, P.; OSMOND, Paul; PAOLINI, R.; PRASAD, D.; SYNNEFA, A. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 154, p. 14–33, 2017. ISSN 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2016.12.006.

SANTANA, Crislane Ribeiro De; FERREIRA, Milena; SOUZA, De Lima. IDF de chuvas intensas em Salvador : Alterações e tendências históricas. **XIII encontro nacional de águas urbanas**, v. 13, n. 71, p. 1–11, 2020.

SANTOS, Sylvana Melo dos; FARIAS, Maria Mariah M.W.E.C. de. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 164, p. 1007–1015, 2017. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.251.

SANTOS, Thiago Veloso dos. **Mudanças Climáticas Brasil**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://mudancasclimaticasbrasil.com/>.

SCHEWE, Jacob *et al.* Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 9, p. 3245–3250, 2014. ISSN 00278424. DOI: 10.1073/pnas.1222460110.

SEGNÍNI, Marco Aurélio; BATISTA, João; DEBS, Mounir Khalil El; ROMANHOLO, Giuliano; MAGALHÃES, Fábio Lopes; LIMA, Kleber Chikui. **Programa para especificação da classe de resistência dos tubos de concreto - Versão 2.4**. [S.l.]: Associação Brasileira dos Fabricantes de Tubos de Concreto, 2010.

SEMADENI-DAVIES, Annette; HERNEBRING, Claes; SVENSSON, Gilbert; GUSTAFSSON, Lars Göran. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. **Journal of Hydrology**, v. 350, n. 1-2, p. 100–113, fev. 2008. ISSN 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.05.028.

SERGIO, Djesser Zechner. **Monitoramento do abastecimento de água e esgotamento sanitário da UFSC**. Florianópolis: UFSC, 2022. Disponível em: <https://gestaoambiental.ufsc.br/gestao-das-aguas/abastecimento-de-agua/monitoramento-do-consumo-de-agua/>.

SHARMA, Bharat R.; SMAKHTIN, Vladimir U. Potential of water harvesting as a strategic tool for drought mitigation. **International Water Management Institute**, 2006.

SILVA, Cristina Matos; SOUSA, Vitor; CARVALHO, Nuno Vaz. Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier B.V., v. 94, p. 21–34, 2015. ISSN 18790658. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.11.004.

SILVA, Patrícia S.; BASTOS, Ana; LIBONATI, Renata; RODRIGUES, Julia A.; DACAMARA, Carlos C. Impacts of the 1.5 °C global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 446, May, p. 193–203, 2019. ISSN 03781127. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.05.047.

SILVEIRA, André; GOLDENFUM, Joel. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **Revista**

Brasileira de Recursos Hídricos, FapUNIFESP (SciELO), v. 12, n. 2, p. 157–168, 2007. ISSN 2318-0331. DOI: 10.21168/rbrh.v12n2.p157-168.

SINGH, Avishreshth; VADDY, Poornachandra; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. Quantification of embodied energy and carbon footprint of pervious concrete pavements through a methodical lifecycle assessment framework. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 161, May, p. 104953, out. 2020. ISSN 18790658. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104953.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgoto - 2019**. v. 44. [S.l.], 2020. P. 1689–1699. ISBN 9788578110796.

SODRAMAR. **Clorador Flutuante - Sodramar**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.sodramar.com.br/produto/acessorios-para-limpeza/clorador-flutuante/clorador-flutuante/>.

SORIANO, Érico; DE RESENDE LONDE, Luciana; DI GREGORIO, Leandro Torres; COUTINHO, Marcos Pellegrini; SANTOS, Leonardo Bacellar Lima. Water crisis in são paulo evaluated under the disaster's point of view. **Ambiente e Sociedade**, Universidade Estadual de Campinas, v. 19, n. 1, p. 21–42, jan. 2016. ISSN 1414753X. DOI: 10.1590/1809-4422ASOC150120R1V1912016.

SRISHANTHA, Uvini; RATHNAYAKE, Upaka. Sustainable urban drainage systems (SUDS) – What it is and where do we stand today? **Engineering and Applied Science Research**, v. 44, n. 4, p. 235–241, 2017. ISSN 25396218. DOI: 10.14456/easr.2017.36.

SWEENEY, James F.; PATE, Michael B. Lifecycle Analysis of a Single-Family Residential Rainwater Harvesting System in a Subtropical, Metropolitan Environment. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment**, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 3, n. 4, p. 04017012, nov. 2017. ISSN 2379-6111. DOI: 10.1061/jswbay.0000832.

TALEGHANI, Mohammad; BERARDI, Umberto. The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. **Urban Climate**, Elsevier B.V., v. 24, p. 449–459, 2018. ISSN 22120955. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.05.007.

TARANTINI, M.; FERRI, F. A life cycle assessment study of the environmental sustainability of domestic water saving techniques. **Sustainable World**, v. 6, p. 579–589, 2003. ISSN 14769581.

TARGA, Marcelo dos Santos; BATISTA, Getulio Teixeira. Benefícios e legados da crise da água no Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. 2, p. 445–458, 2015. ISSN 1980993X. DOI: doi:10.4136/ambi-agua.1629.

TARPANI, Raphael Ricardo Zepon; LAPOLLI, Flávio Rubens; LOBO RECIO, María Ángeles; GALLEGO-SCHMID, Alejandro. Comparative life cycle assessment of three alternative techniques for increasing potable water supply in cities in the Global South. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, 2021. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125871.

TECHNIK, 3P. **Conjunto Mangueira Boia 1"2,5 metros 3P para reservatório de água**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.reformala.com.br/conjunto-mangueira-boia-succao-1-25-metros-3p>.

TESTON, Andrea; GERALDI, Matheus Soares; COLASIO, Barbara Müller; GHISI, EneDIR. Rainwater harvesting in buildings in Brazil: A literature review. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2018. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w10040471.

THIVES, Liseane Padilha; GHISI, EneDIR; BRECHT, Douglas Gherardt; PIRES, Dario Menegasso. Filtering capability of porous asphalt pavements. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 2, p. 6–8, 2018. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w10020206.

THOMASSEN, Gwenny; HUYSVELD, Sophie; BOONE, Lieselot; VILAIN, Céline; GEYSEN, David; HUYSMAN, Koen; COOLS, Ben; DEWULF, Jo. The environmental impact of household's water use: A case study in Flanders assessing various water sources, production methods and consumption patterns. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 770, mai. 2021. ISSN 18791026. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145398.

THOMSON, Allison M. *et al.* RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011. ISSN 01650009. DOI: 10.1007/s10584-011-0151-4.

THOMSON REUTERS. **Web of Knowledge. Who we are**. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <http://wokinfo.com/about/howweare/>.

TIGRE. **Manual de drenagem - Tigre**. Joinville - SC: Tigre, 2022. Disponível em: <https://www.tigre.com.br/en/technical-materials>.

TSA. Permeable Pavement. *In*: TENNESSEE Permanent Stormwater Management and Design Guidance Manual. Tennessee: Tennessee Stormwater Association, 2015. P. 187–214.

TUCCI, Carlos E M. Textos para Discussão CEPAL • IPEA Gestão da Drenagem Urbana, p. 50, 2012.

TURCO, Michele; BRUNETTI, Giuseppe; PALERMO, Stefania Anna; CAPANO, Gilda; GROSSI, Giovanna; MAIOLO, Mario; PIRO, Patrizia. On the environmental benefits of a permeable pavement: metals potential removal efficiency and Life Cycle Assessment. **Urban Water Journal**, Taylor & Francis, v. 17, n. 7, p. 619–627, 2020. ISSN 17449006. DOI: 10.1080/1573062X.2020.1713380.

VALDEZ, M. Carmen; ADLER, Ilan; BARRETT, Mark; OCHOA, Ricardo; PÉREZ, Angel. The Water-Energy-Carbon Nexus: Optimising Rainwater Harvesting in Mexico City. **Environmental Processes**, Springer Basel, v. 3, n. 2, p. 307–323, jun. 2016. ISSN 21987505. DOI: 10.1007/s40710-016-0138-2.

VARGAS-PARRA, M. Violeta; ROVIRA-VAL, M. Rosa; GABARRELL, Xavier; VILLALBA, Gara. Rainwater harvesting systems reduce detergent use. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer Verlag, v. 24, n. 5, p. 809–823, mai. 2019. ISSN 16147502. DOI: 10.1007/s11367-018-1535-8.

VIALLE, C.; BUSSET, G.; TANFIN, L.; MONTREJAUD-VIGNOLES, M.; HUAU, M. C.; SABLAYROLLES, C. Environmental analysis of a domestic rainwater harvesting system: A case study in France. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier B.V., v. 102, p. 178–184, set. 2015. ISSN 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.024.

VINCENT, Santiago Urrestarazu; RADHAKRISHNAN, Mohanasundar; HAYDE, Laszlo; PATHIRANA, Assela. Enhancing the economic value of large investments in Sustainable Drainage Systems (SuDS) through inclusion of ecosystems services benefits. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 11, 2017. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w9110841.

- VIRGILIIS, Afonso Luís Corrêa de. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2009. P. 213.
- WANG, Chenghao; WANG, Zhi Hua; KALOUSH, Kamil E.; SHACAT, Joseph. Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 146, April, p. 111171, 2021. ISSN 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111171.
- WANG, Ranran; ECKELMAN, Matthew J.; ZIMMERMAN, Julie B. Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 19, p. 11189–11198, 2013. ISSN 0013936X. DOI: 10.1021/es4026547.
- WANG, Weixia; CHANG, Yuan. The water footprint of permeable sidewalk pavement in China. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, IOP Publishing Ltd, v. 636, n. 1, jan. 2021. ISSN 17551315. DOI: 10.1088/1755-1315/636/1/012018.
- WANG, Yu; LI, Hui; ABDELHADY, Ahmed; LI, Hui; HARVEY, John. Initial evaluation methodology and case studies for life cycle impact of permeability of permeable pavements. **International Journal of Transportation Science and Technology**, Tongji University, v. 7, n. 3, p. 169–178, set. 2018. ISSN 20460449. DOI: 10.1016/j.ijstst.2018.07.002.
- WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>.
- WILBY, Robert L.; KEENAN, Rod. **Adapting to flood risk under climate change**. v. 36. [S.l.: s.n.], 2012. P. 348–378. DOI: 10.1177/0309133312438908.
- WINSTON, Ryan J.; AREND, Kristi; DORSEY, Jay D.; HUNT, William F. Water quality performance of a permeable pavement and stormwater harvesting treatment train stormwater control measure. **Blue-Green Systems**, v. 2, n. 1, p. 91–111, 2020a. DOI: 10.2166/bgs.2020.914.

WINSTON, Ryan J.; AREND, Kristi; DORSEY, Jay D.; JOHNSON, Jeffrey P.; HUNT, William F. Hydrologic Performance of a Permeable Pavement and Stormwater Harvesting Treatment Train Stormwater Control Measure. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment**, v. 6, n. 1, p. 04019011, 2020b. ISSN 2379-6111. DOI: 10.1061/jswbay.0000889.

WOODS-BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R.; SHAFFER, P. **The SuDS Manual**. [S.l.: s.n.], 2011. P. 1–599. ISBN 978-0-86017-697-8.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Risks Report 2021: 16th Edition**. [S.l.: s.n.], 2021. P. 96. ISBN 9782940631247. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf.

XIE, Ning; AKIN, Michelle; SHI, Xianming. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 210, p. 1605–1621, fev. 2019. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.134.

XU, Changqing; TANG, Tang; JIA, Haifeng; XU, Ming; XU, Te; LIU, Zijing; LONG, Ying; ZHANG, Rongrong. Benefits of coupled green and grey infrastructure systems: Evidence based on analytic hierarchy process and life cycle costing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, April, p. 1–10, 2019. ISSN 18790658. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104478.

YAN, Xiaoyu; WARD, Sarah; BUTLER, David; DALY, Bébhinn. Performance assessment and life cycle analysis of potable water production from harvested rainwater by a decentralized system. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 172, p. 2167–2173, jan. 2018. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.198.

YAO, Xingliang; WANG, Wenlong; LIU, Min; YAO, Yonggang; WU, Shuang. Synergistic use of industrial solid waste mixtures to prepare ready-to-use lightweight porous concrete. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 211, p. 1034–1043, 2019. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.252.

YU, Bin; LU, Qing. Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 306–309, fev. 2014. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.034.

- YUAN, Xueliang; TANG, Yuzhou; LI, Yue; WANG, Qingsong; ZUO, Jian; SONG, Zhanlong. Environmental and economic impacts assessment of concrete pavement brick and permeable brick production process - A case study in China. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 171, p. 198–208, jan. 2018. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.037.
- ZANDONADI, Leandro; ACQUAOTTA, Fiorella; FRATIANNI, Simona; ZAVATTINI, João Afonso. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, n. 3-4, p. 741–756, 2016. ISSN 14344483. DOI: 10.1007/s00704-015-1391-4.
- ZANGHELINI, G. M; CHERUBINI, E; GALINDRO, B. M; ALVARENGA, R. A. F; SOARES, S. R. A Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil na Última Década. **IV Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**, n. 4, 2014. DOI: 10.13140/2.1.4672.1601.
- ZANNI, Sara; CIPOLLA, Sara Simona; FUSCO, Emanuela di; LENCI, Alessandro; ALTOBELLI, Margherita; CURRADO, Antonio; MAGLIONICO, Marco; BONOLI, Alessandra. Modeling for sustainability: Life cycle assessment application to evaluate environmental performance of water recycling solutions at the dwelling level. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier B.V., v. 17, p. 47–61, jan. 2019. ISSN 23525509. DOI: 10.1016/j.spc.2018.09.002.
- ZHAN, Wenting; CHUI, Ting Fong May. Evaluating the life cycle net benefit of low impact development in a city. **Urban Forestry and Urban Greening**, Elsevier GmbH., v. 20, p. 295–304, 2016. ISSN 16108167. DOI: 10.1016/j.ufug.2016.09.006.
- ZHANG, Shouhong; ZHANG, Jianjun; YUE, Tongjia; JING, Xueer. Impacts of climate change on urban rainwater harvesting systems. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 665, p. 262–274, 2019. ISSN 18791026. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.135.
- ZHANG, Shuhan; MENG, Yingying; PAN, Jiao; CHEN, Jiangang. Pollutant reduction effectiveness of low-impact development drainage system in a campus. **Frontiers of Environmental Science and Engineering**, v. 11, n. 4, p. 1–8, 2017. ISSN 2095221X. DOI: 10.1007/s11783-017-0969-8.

ZHOU, Qianqian. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. **Water (Switzerland)**, MDPI AG, v. 6, n. 4, p. 976–992, 2014. DOI: 10.3390/w6040976.

ZILLI, Marcia T.; CARVALHO, Leila M.V.; LIEBMANN, Brant; SILVA DIAS, Maria A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017. ISSN 10970088. DOI: 10.1002/joc.4840.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DADOS DAS LOCALIDADES UTILIZADAS

Tabela 19 – Dados das localidades avaliadas na pesquisa.

Cidade	Estado	População (pessoas)	Área (km²)	Pluviômetro
Belo Horizonte	MG	2.530.701	331,35	83587
Brasília	DF	3.094.325	5.760,78	83377
Florianópolis	SC	516.524	674,84	83897
Manaus	AM	2.255.903	11.401,09	82331
Salvador	BA	2.900.319	693,45	83229
São Paulo	SP	12.396.372	1.521,11	83781

APÊNDICE B – POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA POTÁVEL POR CIDADE

Figura 78 – Potencial de economia de água potável para Belo Horizonte.

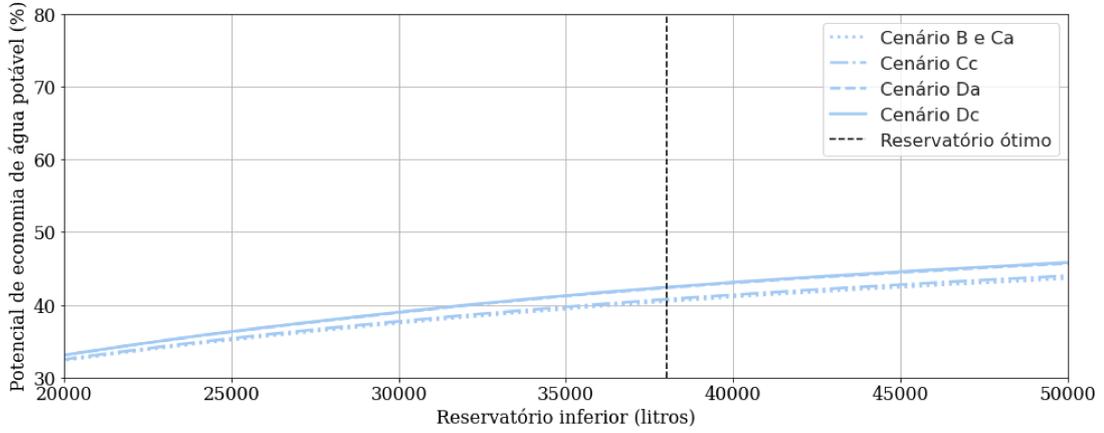


Figura 79 – Potencial de economia de água potável para Brasília.

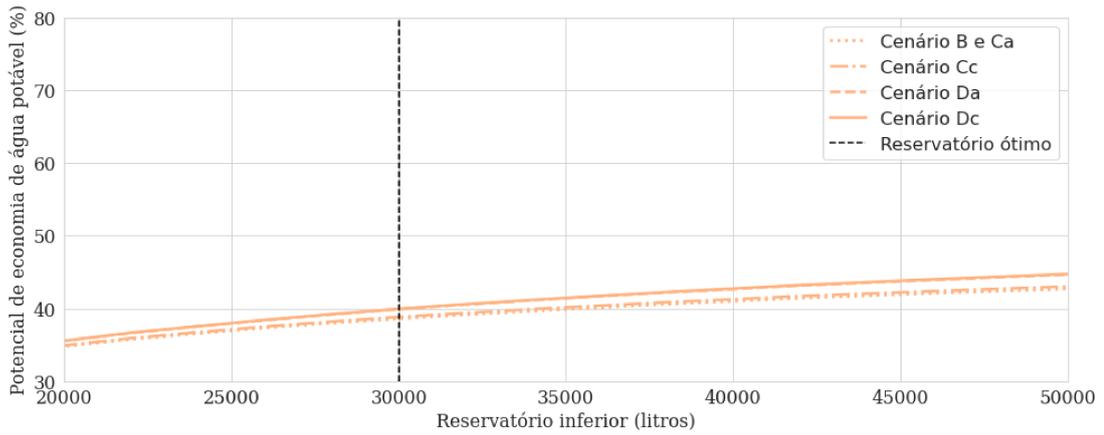


Figura 80 – Potencial de economia de água potável para Florianópolis.

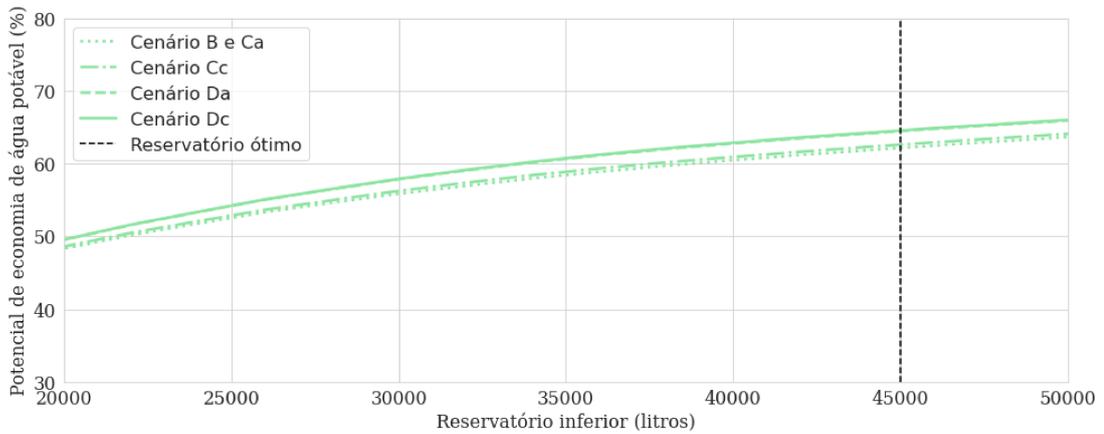


Figura 81 – Potencial de economia de água potável para Manaus.

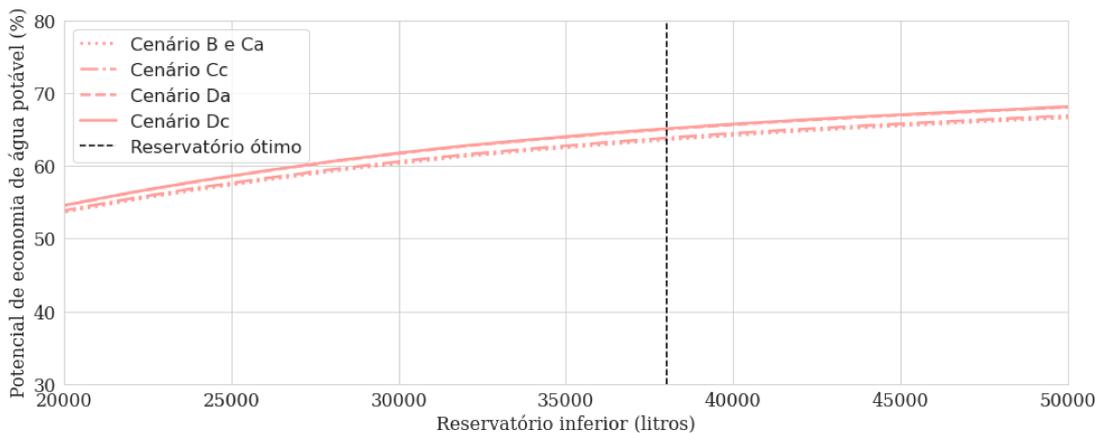


Figura 82 – Potencial de economia de água potável para Salvador.

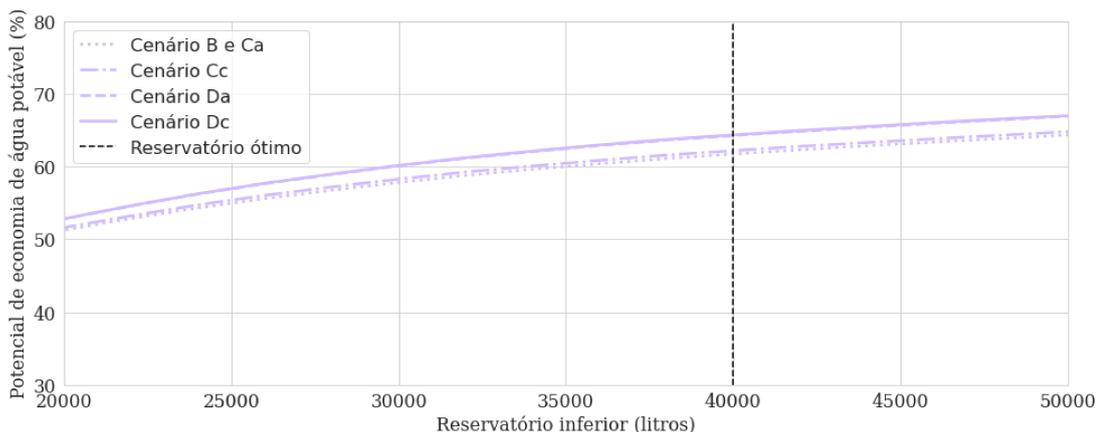
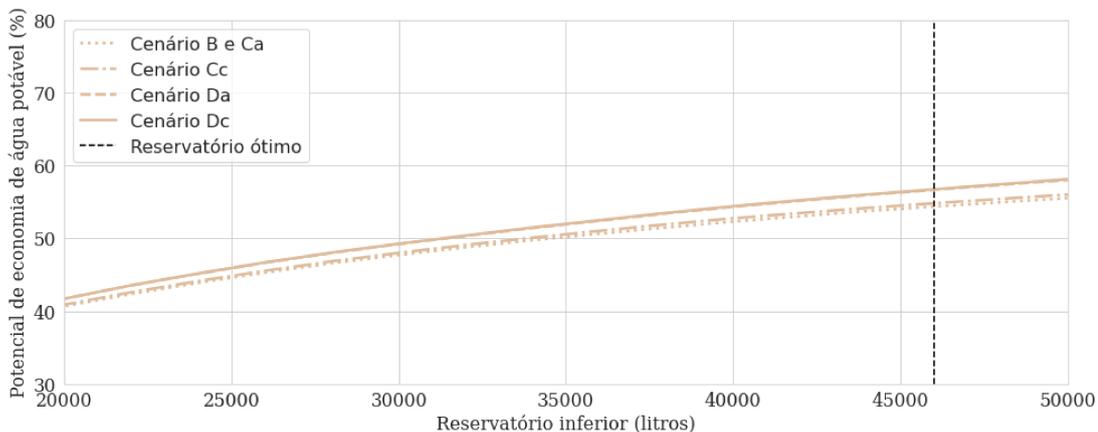


Figura 83 – Potencial de economia de água potável para São Paulo.



APÊNDICE C – INVENTÁRIO DE MATERIAIS E TRANSPORTE

Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV.

Subsistemas	Cenário A	Cenário B	Cenário Ca	Cenário Cc	Cenário Da	Cenário Dc
1. TELHADO						
1.1. Telhas	X ¹					
1.2. Calhas	X ¹					
1.3. Tubulação vertical	X ¹					
2. SISTEMA CAPTAÇÃO ÁGUA PLUVIAL						
2.1. Filtro (descarte de sólidos)	-	X	-	-	X	X
Aço Inox (t)		0,242000			0,242000	0,242000
Transporte filtro (tkm)		1,790800			1,790800	1,790800
Descarte de filtro (t)		0,242000			0,242000	0,242000
Transporte para descarte (tkm)		1,500400			1,500400	1,500400
2.2. Desvio das primeiras águas	-	X	-	-	X	X
Plástico PEAD (t)		0,202000			0,202000	0,202000
Transporte desvio (tkm)		38,38000			38,38000	38,38000
Descarte de plástico (t)		0,202000			0,202000	0,202000
Transporte para descarte (tkm)		1,252400			1,252400	1,252400
2.3. Clorador	-	X	X	X	X	X
Plástico PE (não precisa ser high) (t)		0,013300	0,013300	0,013300	0,013300	0,013300
Transporte clorador (tkm)		1,582700	1,582700	1,582700	1,582700	1,582700
Descarte de clorador (t)		0,013300	0,013300	0,013300	0,013300	0,013300
Transporte para descarte do clorador (tkm)		0,082460	0,082460	0,082460	0,082460	0,082460
2.4. Boia de nível (mangueira-boia)	-	X	X	X	X	X
PEAD (t)		0,000050	0,000050	0,000050	0,000050	0,000050
Latão (t)		0,000820	0,000820	0,000820	0,000820	0,000820
Silicone (t)		0,002000	0,002000	0,002000	0,002000	0,002000
Aço cromado (t)		0,000032	0,000032	0,000032	0,000032	0,000032
Transporte boia de nível (tkm)		0,551380	0,551380	0,551380	0,551380	0,551380
Descarte PEAD (t)		0,000050	0,000050	0,000050	0,000050	0,000050
Descarte demais produtos (t)		0,002852	0,002852	0,002852	0,002852	0,002852
Transporte para descarte (tkm)		0,017992	0,017992	0,017992	0,017992	0,017992
2.5. Dispositivos PEAD (Freio d'água / Sifão)	-	X	X	X	X	X
Plástico PEAD (t)		0,001000	0,001000	0,001000	0,001000	0,001000
Transporte desvio (tkm)		0,190000	0,190000	0,190000	0,190000	0,190000
Descarte de plástico (t)		0,001000	0,001000	0,001000	0,001000	0,001000
Transporte para descarte (tkm)		0,006200	0,006200	0,006200	0,006200	0,006200
3. PAVIMENTO						
3.1 Pavimento tradicional	X	X	-	-	-	-
3.1.1. Subbase	X	X	-	-	-	-
Brita p/ subbase (t)	975,0000	975,0000				
Transporte brita Subbase (tkm)	11700,00	11700,00				
Descarte subbase (t)	Desconsiderado					
Transporte descarte (tkm)	Desconsiderado					
3.1.2. Base	X	X	-	-	-	-

Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).

Brita p/ base	700,0000	700,0000				
Transporte brita Base (tkm)	8400,000	8400,000				
Descarte base (t)			Desconsiderado			
Transporte descarte (tkm)						
3.1.3. Revestimento asfáltico	X	X	-	-	-	-
Cimento asfáltico de petróleo (CAP) (t)	34,00000	34,00000				
Imprimação (CM-30) (l)	6000,000	6000,000				
Brita para revestimento asfáltico (t)	566,0000	566,0000				
Transporte revestimento asfáltico (tkm)	19019,60	19019,60				
Descarte revestimento asfáltico (t)	605,7000	605,7000				
Transporte descarte (tkm)	7268,400	7268,400				
3.2. Pavimento permeável	-	-	X	X	X	X
3.2.1. Subbase	-	-	X	X	X	X
Brita p/ reservoir course			2025,000	1350,000	2025,000	1350,000
Transporte brita reservoir course (tkm)			24300,00	16200,00	24300,00	16200,00
Descarte reservoir course (t)					Desconsiderado	Desconsiderado
Transporte descarte (tkm)						
3.2.2. Base	-	-	X	X	X	X
Brita p/ choker course			650,0000	650,0000	650,0000	650,0000
Transporte brita choker course (tkm)			7800,000	7800,000	7800,000	7800,000
Descarte choker course (t)					Desconsiderado	Desconsiderado
Transporte descarte (tkm)						
3.2.3. Revestimento asfáltico	-	-	X	-	X	-
Cimento asfáltico de petróleo (CAP) (t)			34,00000		34,00000	
Imprimação (CM-30) (litros)			4000,000		4000,000	
Brita para revestimento asfáltico (t)			566,0000		566,0000	
Transporte revestimento asfáltico (tkm)			18434,40		18434,40	
Descarte revestimento asfáltico (t)			603,8000		603,8000	
Transporte descarte (tkm)			7245,600		7245,600	
3.2.3. Revestimento blocos concreto	-	-	-	X	-	X
Concreto para blocos de concreto permeável (m³)				239,5833		239,5833
Pó de pedra para bedding coarse (t)				270,0000		270,0000
Transporte blocos de concreto (tkm)				72240,00		72240,00
Descarte bedding coarse (t)				270,0000		270,0000
Descarte blocos de concreto (t)				575,0000		575,0000
Transporte descarte (tkm)				5239,000		5239,000
3.2.4. Demais itens	-	-	X	X	X	X
Drenos (PEAD) (t)			0,756000	0,756000	0,756000	0,756000
Manta impermeável (PEAD) (m²)			7500,000	7500,000	7500,000	7500,000
Transporte demais itens (tkm)			1144,884	1144,884	1144,884	1144,884
Descarte demais itens (t)					Desconsiderado	Desconsiderado
Transporte descarte (tkm)						
4. DRENAGEM						
4.1. Bocas de lobo (somente adicionais)	X	X	-	-	-	-
Blocos cerâmicos maciços (unidades)	2720,000	2720,000				
Concreto (m³)	2,550000	2,550000				
Armadura (t)	0,204000	0,204000				

Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).

Transporte de blocos cerâmicos para local (tkm)	141,9840	141,9840				
Transporte de concreto para local (tkm)	61,20000	61,20000				
Transporte de armadura para local (tkm)	37,33200	37,33200				
Descarte blocos (t)						
Transporte descarte blocos (tkm)	Desconsiderado					
Descarte concreto (t)						
Transporte descarte concreto (tkm)	Desconsiderado					
Descarte armadura (t)						
Transporte descarte armadura (tkm)	Desconsiderado					
4.2. Caixas de inspeção + Caixas especiais	X	X	X	X	X	X
Blocos cerâmicos maciços (unidades) / (t)	848 (1,5264)	320 (0,5760)	688 (1,2384)	688 (1,2384)	528 (0,9504)	528 (0,9504)
Concreto (m³)	0,712500	0,255000	0,585000	0,585000	0,457500	0,457500
Armadura (kg)	57,00000	20,40000	46,80000	46,80000	36,60000	36,60000
Transporte de blocos cerâmicos para local (tkm)	44,26560	16,70400	35,91360	35,91360	27,56160	27,56160
Transporte de concreto para local (tkm)	17,10000	6,120000	14,04000	14,04000	10,98000	10,98000
Transporte de armadura para local (tkm)	10,43100	3,733200	8,564400	8,564400	6,697800	6,697800
Descarte blocos (t)						
Transporte descarte blocos (tkm)	Desconsiderado		Desconsiderado		Desconsiderado	
Descarte concreto (t)						
Transporte descarte concreto (tkm)	Desconsiderado		Desconsiderado		Desconsiderado	
Descarte armadura (t)						
Transporte descarte armadura (tkm)	Desconsiderado		Desconsiderado		Desconsiderado	
4.3. Galeria pluvial + Extravasão	X	X	X	X	X	X
Concreto (m³) / (t)	35,616 (85,478)	35,127 (84,304)	21,221 (50,931)	21,221 (50,931)	21,812 (52,349)	21,812 (52,349)
Transporte de concreto para local (tkm)	683,8240	674,4320	407,4453	407,4453	418,7893	418,7893
Lastro de brita (t)	16,67500	16,50000	9,350000	9,350000	9,950000	9,950000
Transporte de brita para local (tkm)	200,1000	198,0000	112,2000	112,2000	119,4000	119,4000
Descarte concreto (t)						
Transporte descarte concreto (tkm)	Desconsiderado		Desconsiderado		Desconsiderado	
Descarte brita (t)						
Transporte descarte brita (tkm)	Desconsiderado		Desconsiderado		Desconsiderado	
5. RESERVATÓRIOS						
5.1. Reservatório superior potável (volume em litros)	X (10.000)	X (6000)	X (6000)	X (6000)	X (6000)	X (6000)
Reservatório de PEAD (t)	0,189800	0,109400	0,109400	0,109400	0,109400	0,109400
Transporte de reservatório de PEAD (tkm)	29,22920	16,84760	16,84760	16,84760	16,84760	16,84760
Descarte de reservatório de PEAD (t)	0,189800	0,109400	0,109400	0,109400	0,109400	0,109400
Transporte descarte (tkm)	1,176760	0,678280	0,678280	0,678280	0,678280	0,678280
5.2. Reservatório inferior potável (volume em litros)	X (15.000)	X (9000)	X (9000)	X (9000)	X (9000)	X (9000)
Reservatório de PEAD (t)	0,284700	0,164100	0,164100	0,164100	0,164100	0,164100
Transporte de reservatório de PEAD (tkm)	43,84380	25,27140	25,27140	25,27140	25,27140	25,27140
Descarte de reservatório de PEAD (t)	0,284700	0,164100	0,164100	0,164100	0,164100	0,164100
Transporte descarte (tkm)	1,765140	1,017420	1,017420	1,017420	1,017420	1,017420
5.3. Reservatório superior pluvial (5000 litros)	-	X	X	X	X	X

Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).

Reservatório de PEAD (t)		0,094900	0,094900	0,094900	0,094900	0,094900
Transporte de reservatório de PEAD (tkm)		14,61460	14,61460	14,61460	14,61460	14,61460
Descarte de reservatório de PEAD (t)		0,094900	0,094900	0,094900	0,094900	0,094900
Transporte descarte (tkm)		0,588380	0,588380	0,588380	0,588380	0,588380
5.4. Reservatório inferior pluvial (45.000 litros)	-	X	X	X	X	X
Concreto (m³)		19,50000	19,50000	19,50000	19,50000	19,50000
Aço estrutural (t)		1,755000	1,755000	1,755000	1,755000	1,755000
Formas de madeira (m³)		3,446272	3,446272	3,446272	3,446272	3,446272
Impermeabilização (m²)		60,50000	60,50000	60,50000	60,50000	60,50000
Transporte de concreto para local (tkm)		468,0000	468,0000	468,0000	468,0000	468,0000
Transporte de aço para local (tkm)		321,1650	321,1650	321,1650	321,1650	321,1650
Transporte de formas para local (tkm)		12,32042	12,32042	12,32042	12,32042	12,32042
Transporte material impermeabilização (tkm)		26,39000	26,39000	26,39000	26,39000	26,39000
Descarte concreto (t)		46,80000	46,80000	46,80000	46,80000	46,80000
Descarte aço (t)		1,755000	1,755000	1,755000	1,755000	1,755000
Descarte madeiras (t)		2,240077	2,240077	2,240077	2,240077	2,240077
Descarte material impermeabilização (t)		0,035000	0,035000	0,035000	0,035000	0,035000
Transporte para descarte (tkm)		315,1464	315,1464	315,1464	315,1464	315,1465
6. RECALQUE						
6.1. Motobomba portátil (AA com 1/2 e resto 1/3)	X	X	X	X	X	X
Ferro fundido (t)		0,016600	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte motobomba (tkm)		3,137400	2,116800	2,116800	2,116800	2,116800
Descarte da motobomba (t)		0,016600	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte para descarte (tkm)		0,102920	0,069440	0,069440	0,069440	0,069440
Energia para bombeamento por ano (kWh/ano)		561,2300	379,0200	379,0200	379,0200	379,0200
6.2. Motobomba pluvial (1/3)	-	X	X	X	X	X
Ferro fundido (t)		0,011200	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte motobomba (tkm)		2,116800	2,116800	2,116800	2,116800	2,116800
Descarte da motobomba (t)		0,011200	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte para descarte (tkm)		0,069440	0,069440	0,069440	0,069440	0,069440
Energia para bombeamento por ano (kWh/ano)		379,0200	379,0200	379,0200	379,0200	379,0200
6.3. Válvula solenóide	-	X	X	X	X	X
Latão (t)		0,001980	0,001980	0,001980	0,001980	0,001980
Transporte válvula (tkm)		0,014652	0,014652	0,014652	0,014652	0,014652
Descarte de válvula (t)		0,001980	0,001980	0,001980	0,001980	0,001980
Transporte para descarte (tkm)		0,012276	0,012276	0,012276	0,012276	0,012276
6.4. Eletroboia de nível	-	X	X	X	X	X
PEAD (t)		0,001000	0,001000	0,001000	0,001000	0,001000
Transporte eletroboia (tkm)		0,007400	0,007400	0,007400	0,007400	0,007400
Descarte da eletroboia (t)		0,001000	0,001000	0,001000	0,001000	0,001000
Transporte para descarte (tkm)		0,006200	0,006200	0,006200	0,006200	0,006200
6.5. Registros	-	X	X	X	X	X
Latão (t)		0,001209	0,001209	0,001209	0,001209	0,001209
Transporte válvula (tkm)		0,229710	0,229710	0,229710	0,229710	0,229710
Descarte de válvula (t)		0,001209	0,001209	0,001209	0,001209	0,001209
Transporte para descarte (tkm)		0,007496	0,007496	0,007496	0,007496	0,007496

Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).

6.6. <i>Tubulação recalque potável</i>	X ¹	X ¹	X ¹	X ¹	X ¹	X ¹
6.7. <i>Tubulação recalque pluvial</i>	-	X	X	X	X	X
Tubo de PVC (t)		0,010308	0,017281	0,017281	0,017281	0,017281
Transporte tubo de PVC (tkm)		1,855380	3,110490	3,110490	3,110490	3,110490
Descarte tubo de PVC (t)		0,010308	0,017281	0,017281	0,017281	0,017281
Transporte para descarte (tkm)		0,063908	0,107139	0,107139	0,107139	0,107139
6.8. <i>Dispositivos adicionais (redução, etc)</i>	-	X	X	X	X	X
Plásticos (PVC)		0,003092	0,005184	0,005184	0,005184	0,005184
Transporte		0,556614	0,933147	0,933147	0,933147	0,933147
Descarte		0,003092	0,005184	0,005184	0,005184	0,005184
Transporte para descarte (tkm)		0,019172	0,032142	0,032142	0,032142	0,032142
7. DISTRIBUIÇÃO						
7.1. <i>Componentes para a distribuição da água pluvial</i>	-	X	X	X	X	X
Tubos em PVC (t)		0,036000	0,036000	0,036000	0,036000	0,036000
Transporte tubos (tkm)		6,480000	6,480000	6,480000	6,480000	6,480000
Descarte tubo de PVC (t)		0,036000	0,036000	0,036000	0,036000	0,036000
Transporte para descarte (tkm)		0,223200	0,223200	0,223200	0,223200	0,223200
8. FASE DE USO						
8.1. <i>Melhoria da qualidade da água</i>	-	-	X	X	X	X
Variação da massa de poluente (kg) - Nitrogênio total			6,950000	6,020000	6,950000	6,020000
Variação da massa de poluente (kg) - Fósforo total			248,7300	215,7000	248,7300	215,7000
Variação da massa de poluente (kg) - Metais pesados (Zn)			42,360000	42,360000	42,360000	42,360000
8.2. <i>Desvio de tráfego por manutenção ou inundação</i>	Desconsiderado por ser um estacionamento					
8.3. <i>UHI</i>	-	-	-	X	-	X
CO2 mitigado pelo aumento do albedo (t)				185,0000		185,0000
8.4. <i>Offset da Carbonatação</i>	-	-	-	X	-	X
CO2 mitigado pela carbonatação (t)				6,061000		6,061000
8.5. <i>Iluminação</i>	Desconsiderado por ser um estacionamento					
8.6. <i>Aumento do IRI</i>	Desconsiderado por ser um estacionamento					
8.7. <i>Reuso da água pluvial</i>	Já considerado no estudo					
8.8. <i>Efeitos térmicos nos prédios adjacentes</i>	Não realizado					
9. MANUTENÇÃO E RECORRÊNCIA						
9.1. <i>Recorrência impermeabilização (1x)</i>	-	X	X	X	X	X
Impermeabilização (m ²)		60,50000	60,50000	60,50000	60,50000	60,50000
Transporte material impermeabilização (tkm)		26,39000	26,39000	26,39000	26,39000	26,39000
Descarte material impermeabilização (t)		0,035000	0,035000	0,035000	0,035000	0,035000
Transporte para descarte (tkm)		0,217000	0,217000	0,217000	0,217000	0,217000
9.2. <i>Recorrência válvula solenóide (1,67x)</i>	-	X	X	X	X	X
Latão (t)		0,003307	0,003307	0,003307	0,003307	0,003307
Transporte válvula (tkm)		0,024469	0,024469	0,024469	0,024469	0,024469
Descarte de válvula (t)		0,003307	0,003307	0,003307	0,003307	0,003307
Transporte para descarte (tkm)		0,020501	0,020501	0,020501	0,020501	0,020501
9.3. <i>Recorrência eletrobóia (realimentador) (1x)</i>	-	X	X	X	X	X
PEAD (t)		0,001000	0,001000	0,001000	0,001000	0,001000
Transporte eletroboia (tkm)		0,007400	0,007400	0,007400	0,007400	0,007400
Descarte da eletroboia (t)		0,001000	0,001000	0,001000	0,001000	0,001000

Tabela 20 – Inventário de materiais utilizados para a ACV (continuação).

Transporte para descarte (tkm)		0,006200	0,006200	0,006200	0,006200	0,006200
9.4. Motobomba potável (1x)	X	X	X	X	X	X
Ferro fundido (t)	0,016600	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte motobomba (tkm)	3,137400	2,116800	2,116800	2,116800	2,116800	2,116800
Descarte da motobomba (t)	0,016600	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte para descarte (tkm)	0,102920	0,069440	0,069440	0,069440	0,069440	0,069440
9.5. Motobomba pluvial (1x)	-	X	X	X	X	X
Ferro fundido (t)		0,011200	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte motobomba (tkm)		2,116800	2,116800	2,116800	2,116800	2,116800
Descarte da motobomba (t)		0,011200	0,011200	0,011200	0,011200	0,011200
Transporte para descarte (tkm)		0,069440	0,069440	0,069440	0,069440	0,069440
9.6. Clorador (3x)	-	X	X	X	X	X
Plástico PE (não precisa ser high) (t)		0,039900	0,039900	0,039900	0,039900	0,039900
Transporte clorador (tkm)		4,748100	4,748100	4,748100	4,748100	4,748100
Descarte de cloro (t)		0,039900	0,039900	0,039900	0,039900	0,039900
Transporte para descarte (tkm)		0,247380	0,247380	0,247380	0,247380	0,247380
Cloro para limpeza do reservatório superior (t/ano)		0,034767	0,034767	0,034767	0,034767	0,034767
9.7. Manutenção	-	-	X	X	X	X
Maquinário para aspiração e recuperação da infiltração (h)			960,0000	960,0000	960,0000	960,0000
10. TRATAMENTO DE ÁGUA DA CONCESSIONÁRIA						
10.1. Operação	X	X	X	X	X	X
Energia para entrega da água potável (kWh/ano)	835,1429	316,1015	316,1015	312,3434	296,8933	296,1417
Água potável entregue (m³/ano)	2257,143	854,3286	854,3286	844,1714	802,4143	800,3829

Legenda:

- Colorido amarelo ou traço: Não utilizado no cenário disposto;
- X: Indica a presença do subsistema no cenário;
- X¹: Indica a omissão do item por similaridade entre todos os cenários.

APÊNDICE D – PROCESSOS E FLUXOS CONSIDERADOS NO OPENLCA

Tabela 21 – Processos do Ecoinvent 3.8 utilizados na ACV.

Fluxo utilizado do Ecoinvent (inglês)	Utilizado nos componentes	Processo de produção
Bitumen adhesive compound, hot	Impermeabilização	bitumen adhesive compound production, hot bitumen adhesive compound, hot Cutoff, U - RoW
Bitumen seal	Imprimação	bitumen seal production bitumen seal Cutoff, U - RoW
Brass	Registro, valvula solenóide e boia de nível	brass production brass Cutoff, U - RoW
Carbon dioxide, fossil	Carbonatação e UHI	(1)
Cast iron	Motobombas	cast iron production cast iron Cutoff, U - RoW
Clay brick	Caixas drenagem	clay brick production clay brick Cutoff, U - RoW
Concrete, 25MPa	Drenagem	concrete production, 25MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 6-34% concrete, 25MPa Cutoff, U - BR
Concrete, 35MPa	Revestimento PICP	concrete production, 35MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 6-34% concrete, 35MPa Cutoff, U - BR
Electricity, low voltage	Energia motobombas	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-Southern grid
Gravel, crushed	Sub-base, base, reservoir course, choker course, bedding course, revestimentos e lastro para galerias	gravel production, crushed gravel, crushed Cutoff, U - BR
Inert waste, for final disposal	Descarte de Latão, Aço e outros materiais sem fluxo específico	treatment of inert waste, sanitary landfill inert waste Cutoff, U - RoW
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state	Manutenção	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state Cutoff, U - GLO - Modificado
Mastic asphalt	Revestimentos asfálticos (impermeável e permeável)	mastic asphalt production mastic asphalt Cutoff, U - RoW
Nitrogen - emission to water/ground water	Nitrogênio total (Melhoria da qualidade da água)	(1)
Phosphorus - emission to soil/unspecified	Fósforo total (Melhoria da qualidade da água)	(1)
Plywood	Formas reservatório inferior	plywood production plywood Cutoff, U - RoW
Polyethylene, high density, granulate	Drenos, manta impermeável, bóia, eletrobóia de nível, freio d'água, desvio das primeiras águas, reservatórios água potável e reservatórios superiores água pluvial	polyethylene production, high density, granulate polyethylene, high density, granulate Cutoff, U - RoW
Polyethylene, low density, granulate	Clorador	polyethylene production, low density, granulate polyethylene, low density, granulate Cutoff, U - RoW
Polyvinylchloride, suspension polymerised	Tubulações pluvial	polyvinylchloride production, suspension polymerisation polyvinylchloride, suspension polymerised Cutoff, U - RoW
Reinforcing steel	Armadura reservatório e caixas de drenagem	reinforcing steel production reinforcing steel Cutoff, U - RoW
Silicone product	Boia de nível	silicone product production silicone product Cutoff, U - RoW

Tabela 21 – Processos do Ecoinvent 3.8 utilizados na ACV (continuação).

Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution	Cloro para desinfecção	sodium hypochlorite production, product in 15% solution state sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state Cutoff, U - RoW
Steel, chromium steel 18/8	Boia de nível e filtro descarte de sólidos	steel production, electric, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 Cutoff, U - RoW
Tap water	Água potável entregue	tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U - BR - Modificado
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	Transporte, dependendo do tipo e local de deslocamento	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3	Transporte, dependendo do tipo e local de deslocamento	transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3	Transporte, dependendo do tipo e local de deslocamento	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 Cutoff, U - BR
Waste asphalt	Descarte de materiais asfálticos	treatment of waste asphalt, sanitary landfill waste asphalt Cutoff, U - RoW
Waste bulk iron, excluding reinforcement	Descarte de motobombas	treatment of waste bulk iron, excluding reinforcement, sorting plant waste bulk iron, excluding reinforcement Cutoff, U - RoW
Waste concrete	Descarte de concreto	treatment of waste concrete, inert material landfill waste concrete Cutoff, U - RoW
Waste concrete gravel	Descarte de revestimento asfáltico	treatment of waste concrete gravel, collection for final disposal waste concrete gravel Cutoff, U - RoW
Waste polyethylene	Descarte dispositivos PEAD ou PEBD	treatment of waste polyethylene, sanitary landfill waste polyethylene Cutoff, U - RoW
Waste polyvinylchloride	Descarte tubulações	treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill waste polyvinylchloride Cutoff, U - RoW
Waste wood, untreated	Descarte formas	treatment of waste wood, untreated, sanitary landfill waste wood, untreated Cutoff, U - RoW
Zinc, ion - emission to water/ground water	Zinco (Melhoria da qualidade da água)	(1)

(1) - Ausência de processo por se tratar de fluxo elementar, com emissão para a atmosfera, solo ou corpo hídrico.

APÊNDICE E – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Figura 84 – Variação dos resultados do indicador - Depleção de recursos fósseis.

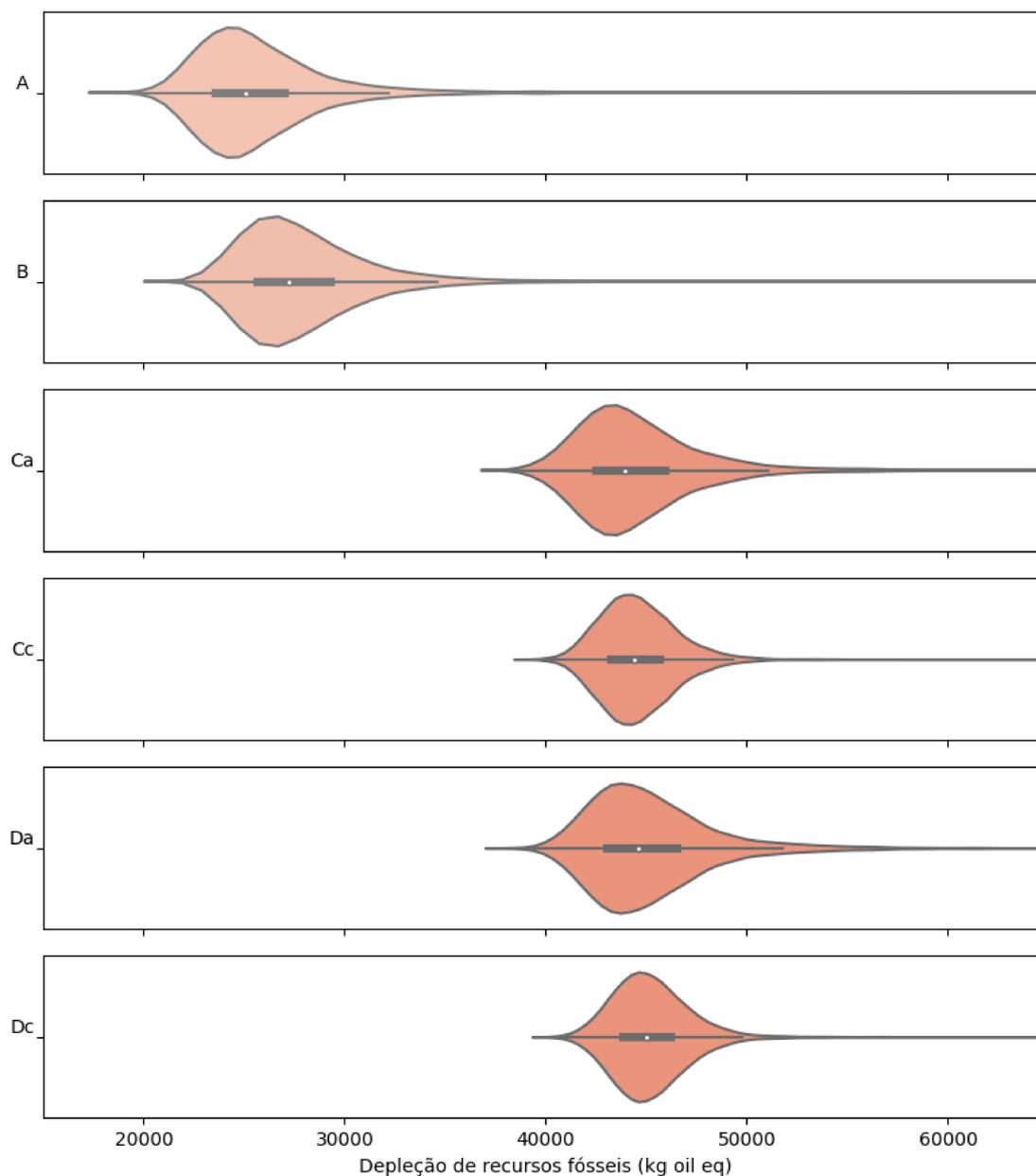


Tabela 22 – Resultados Montecarlo do indicador - Depleção de recursos fósseis.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	2,57E+04	2,28E+04	3,46E+03	1,85E+04	7,80E+04	13 %
B	2,79E+04	2,47E+04	3,50E+03	2,13E+04	1,13E+05	13 %
Ca	4,46E+04	4,14E+04	3,39E+03	3,80E+04	9,64E+04	8 %
Cc	4,46E+04	4,19E+04	2,49E+03	3,93E+04	1,69E+05	6 %
Da	4,51E+04	4,20E+04	3,23E+03	3,82E+04	8,34E+04	7 %
Dc	4,52E+04	4,25E+04	2,05E+03	4,01E+04	7,60E+04	5 %

Figura 85 – Variação dos resultados do indicador - Ecotoxicidade das águas potáveis.

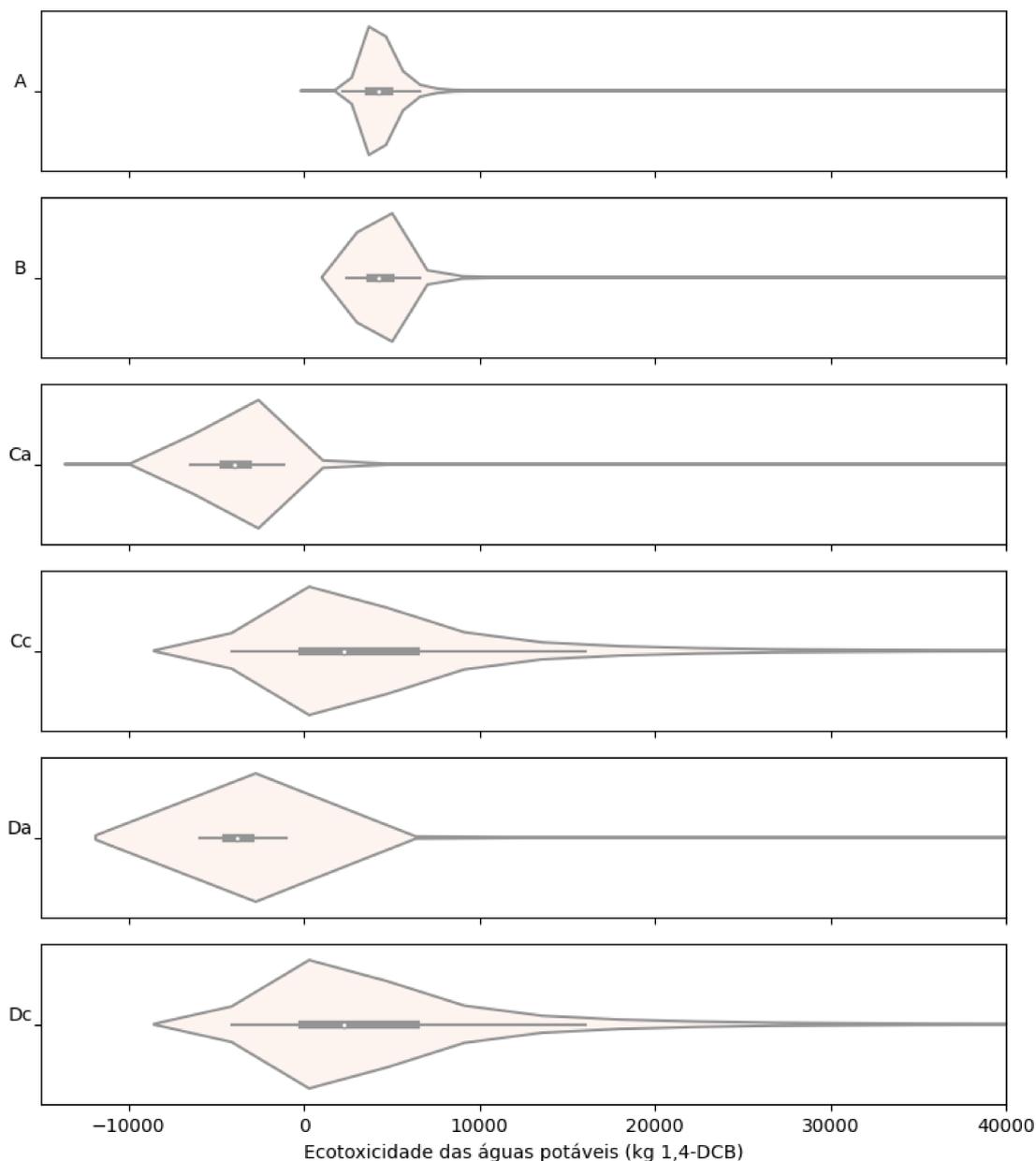


Tabela 23 – Resultados Montecarlo do indicador - Ecotoxicidade das águas potáveis.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	4,47E+03	2,90E+03	2,19E+03	5,93E+02	9,55E+04	49 %
B	4,58E+03	2,74E+03	3,91E+03	2,44E+03	1,98E+05	85 %
Ca	-3,49E+03	-5,80E+03	6,54E+03	-1,13E+04	3,48E+05	-187 %
Cc	5,35E+03	-1,03E+03	6,28E+04	-2,47E+04	5,44E+06	1173 %
Da	-3,13E+03	-5,69E+03	1,63E+04	-5,94E+03	8,85E+05	-520 %
Dc	4,97E+03	-9,21E+02	1,21E+04	-4,13E+03	4,25E+05	244 %

Figura 86 – Variação dos resultados do indicador - Eutrofização das águas potáveis.

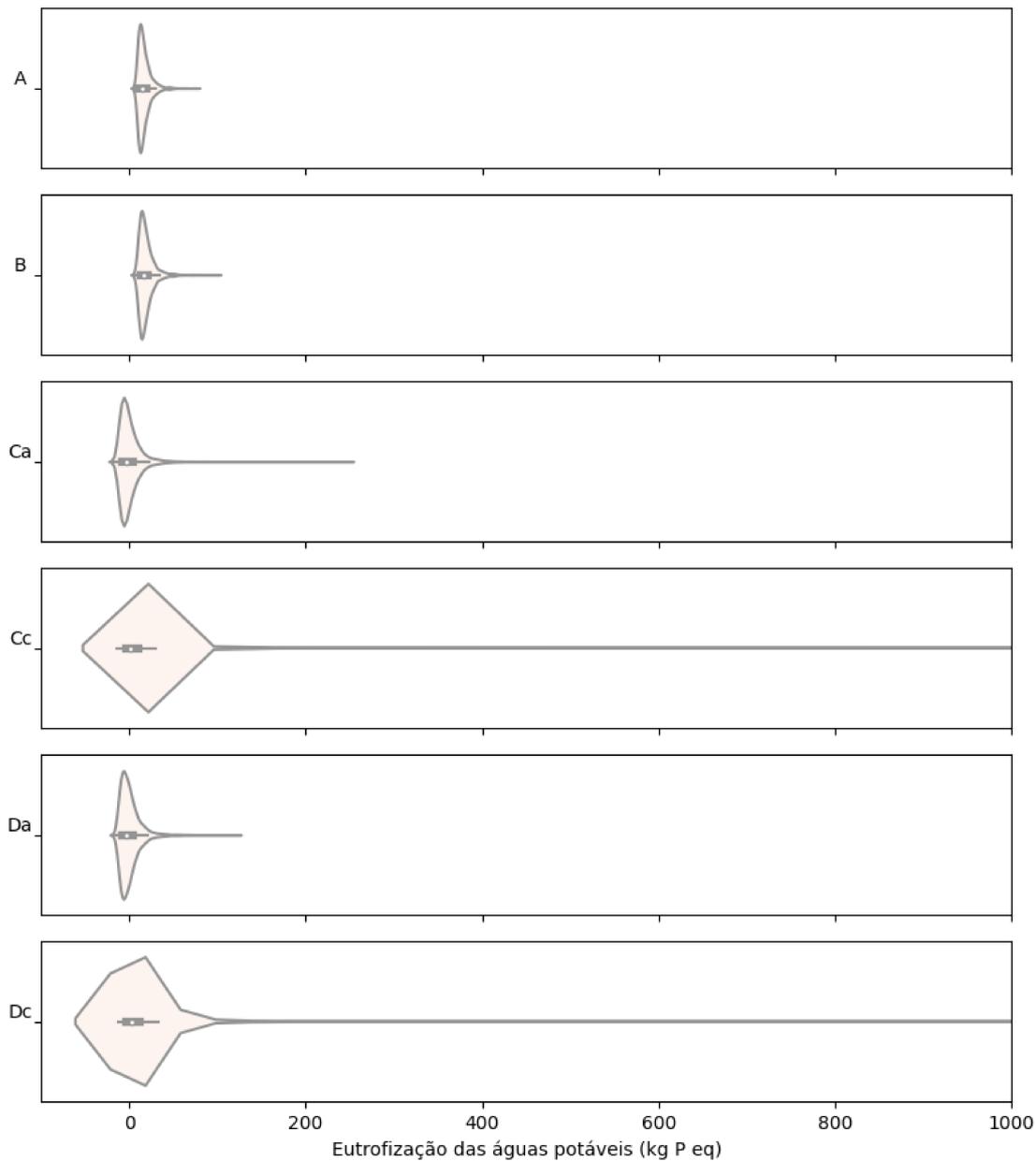


Tabela 24 – Resultados Montecarlo do indicador - Eutrofização das águas potáveis.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	1,65E+01	1,06E+01	7,56E+00	4,62E+00	7,70E+01	46 %
B	1,86E+01	1,18E+01	8,76E+00	5,22E+00	1,00E+02	47 %
Ca	5,43E-02	-9,17E+00	1,34E+01	-1,80E+01	2,49E+02	24630 %
Cc	1,43E+01	-5,97E+00	1,27E+02	-1,33E+01	7,26E+03	891 %
Da	-3,00E-02	-8,77E+00	1,20E+01	-1,73E+01	1,22E+02	-39856 %
Dc	1,68E+01	-5,56E+00	1,31E+02	-1,29E+01	3,83E+03	781 %

Figura 87 – Variação dos resultados do indicador - Aquecimento global.

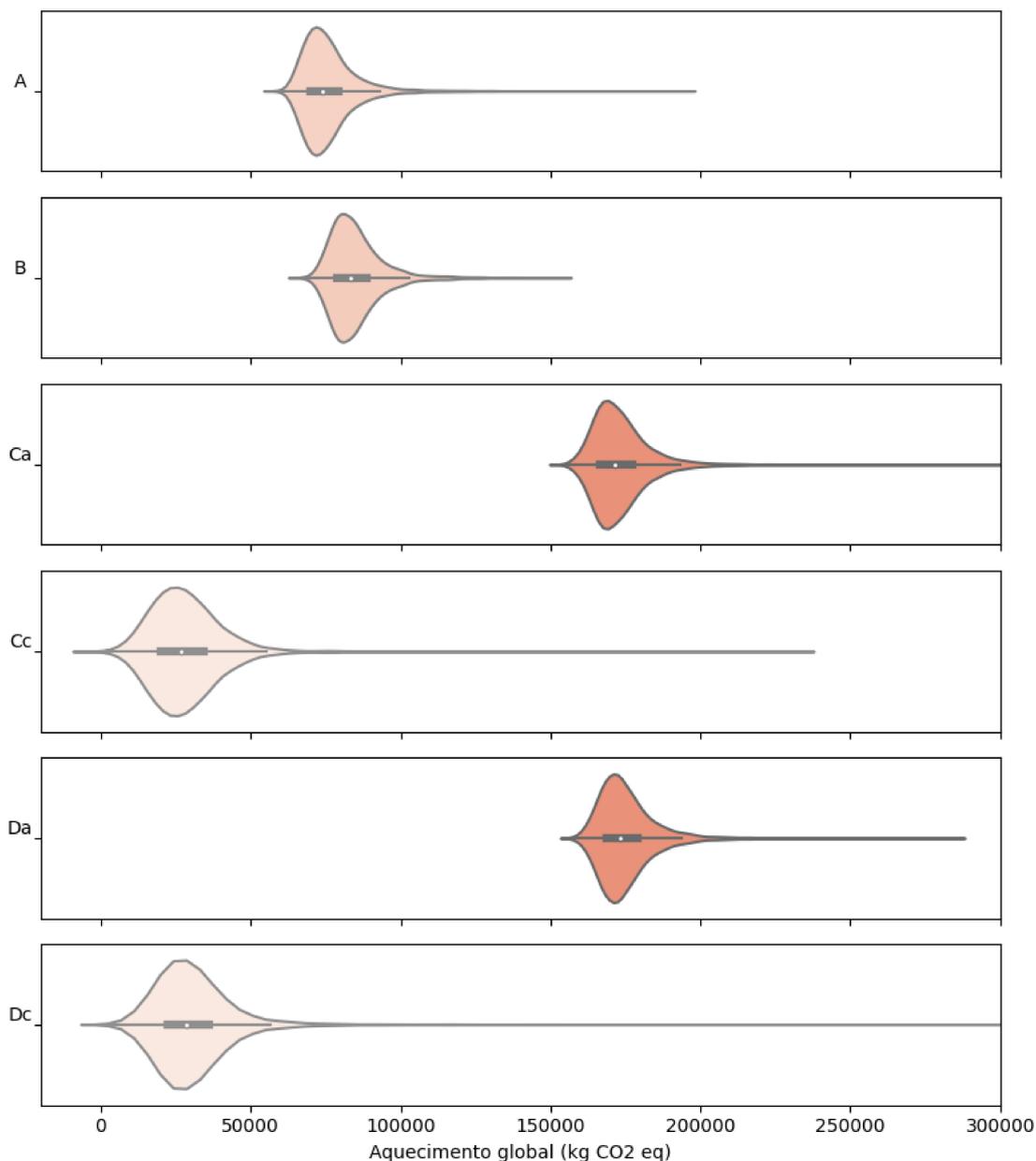


Tabela 25 – Resultados Montecarlo do indicador - Aquecimento global.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	7,59E+04	6,75E+04	9,75E+03	5,79E+04	1,95E+05	13 %
B	8,50E+04	7,54E+04	9,41E+03	6,60E+04	1,53E+05	11 %
Ca	1,73E+05	1,63E+05	1,08E+04	1,54E+05	3,06E+05	6 %
Cc	2,85E+04	1,62E+04	1,45E+04	-2,73E+03	4,17E+05	51 %
Da	1,75E+05	1,65E+05	9,92E+03	1,57E+05	2,85E+05	6 %
Dc	3,07E+04	1,80E+04	1,54E+04	-8,53E+02	4,24E+05	50 %

Figura 88 – Variação dos resultados do indicador - Toxicidade humana cancerígena.

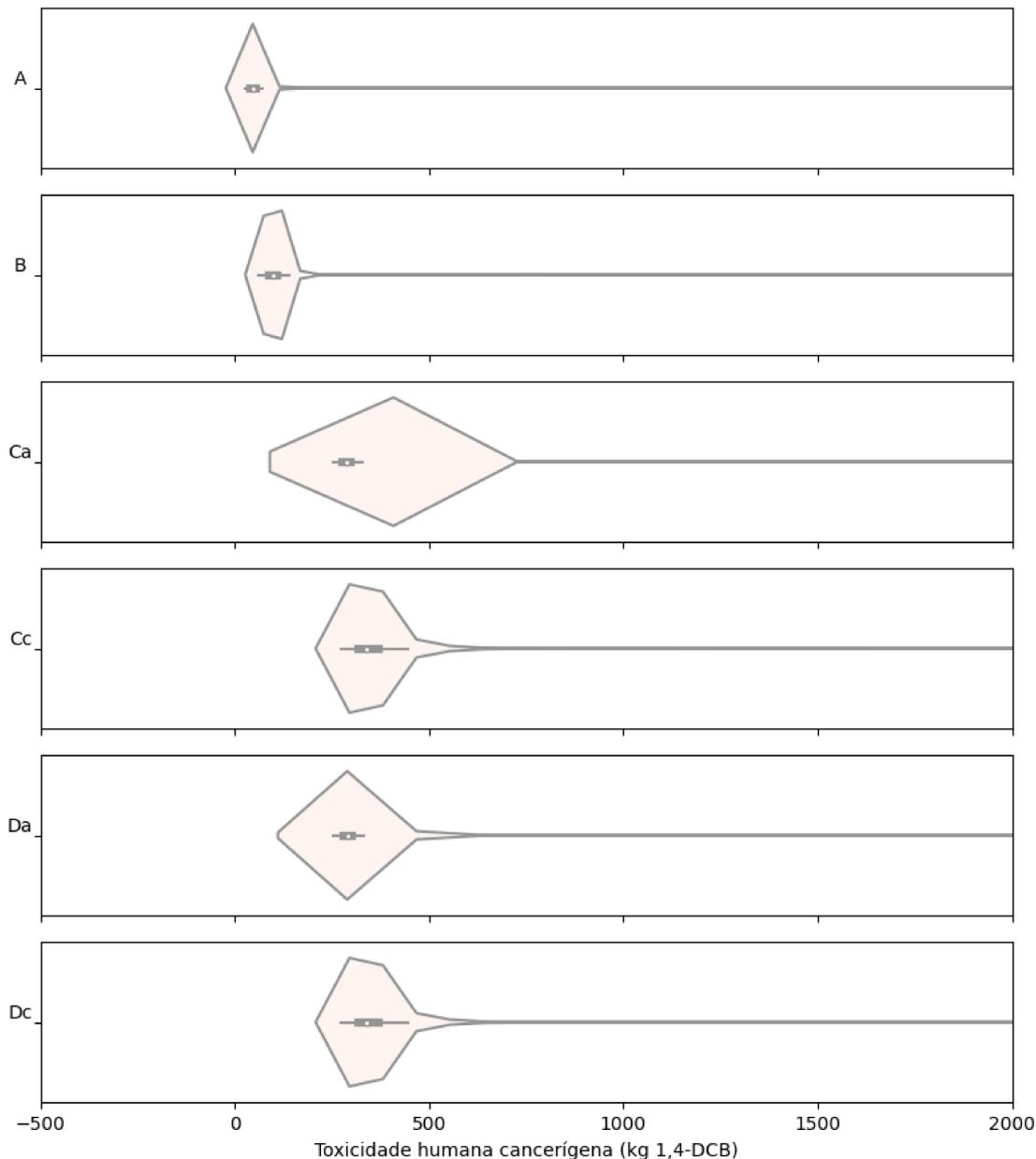


Tabela 26 – Resultados Montecarlo do indicador - Toxicidade humana cancerígena.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	5,22E+01	3,47E+01	1,08E+02	1,57E+01	6,77E+03	206 %
B	1,05E+02	8,22E+01	9,49E+01	6,10E+01	4,66E+03	90 %
Ca	3,00E+02	2,69E+02	4,46E+02	2,52E+02	3,14E+04	149 %
Cc	3,71E+02	3,04E+02	1,23E+03	2,68E+02	1,06E+05	331 %
Da	3,05E+02	2,72E+02	3,89E+02	2,52E+02	1,76E+04	127 %
Dc	3,59E+02	3,07E+02	1,80E+02	2,74E+02	8,68E+03	50 %

Figura 89 – Variação dos resultados do indicador - Toxicidade humana não-cancerígena.

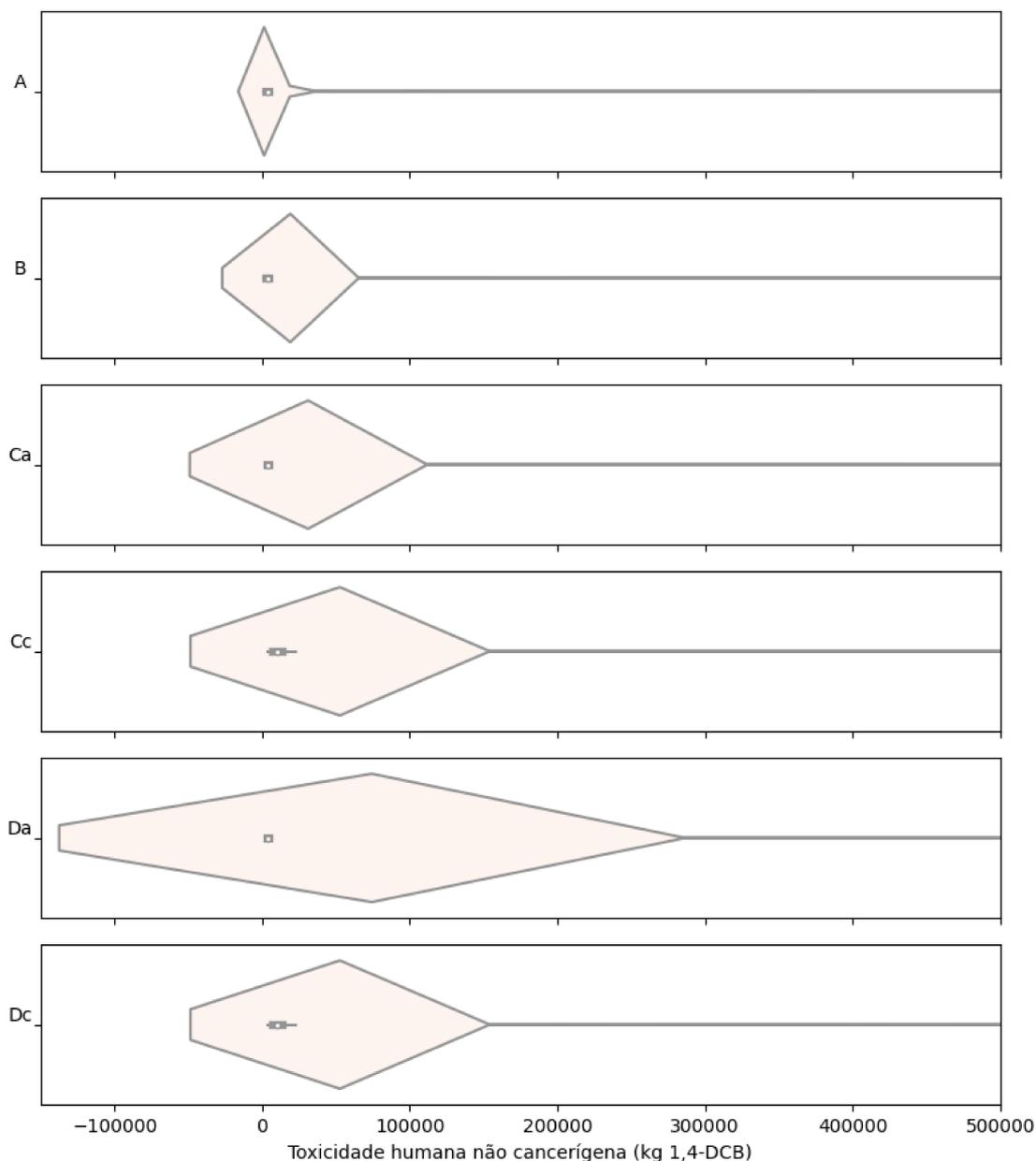


Tabela 27 – Resultados Montecarlo do indicador - Toxicidade humana não-cancerígena.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	5,46E+03	2,34E+03	3,38E+04	-3,79E+03	1,69E+06	619 %
B	7,05E+03	2,27E+03	7,71E+04	1,00E+03	4,51E+06	1093 %
Ca	9,34E+03	2,39E+03	1,38E+05	1,24E+03	7,84E+06	1477 %
Cc	3,54E+04	6,99E+03	1,45E+06	4,02E+03	1,27E+08	4099 %
Da	1,38E+04	2,42E+03	3,78E+05	9,91E+01	2,07E+07	2731 %
Dc	1,66E+04	7,03E+03	1,44E+05	4,01E+03	9,92E+06	869 %

Figura 90 – Variação dos resultados do indicador - Radiação ionizante.

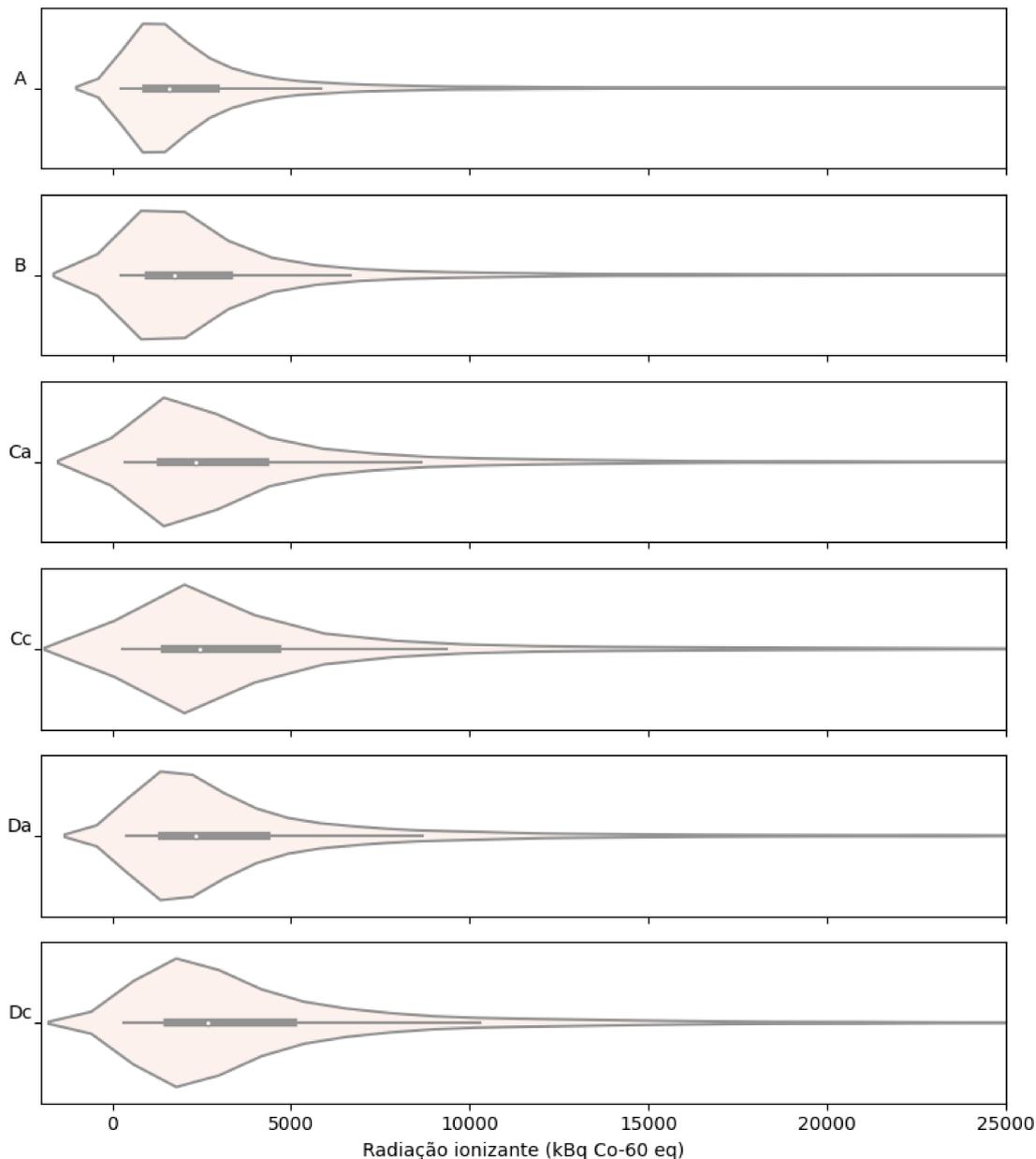


Tabela 28 – Resultados Montecarlo do indicador - Radiação ionizante.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	2,64E+03	1,24E+03	3,40E+03	2,27E+02	5,93E+04	129 %
B	3,08E+03	1,39E+03	5,11E+03	2,27E+02	1,17E+05	166 %
Ca	3,78E+03	1,87E+03	5,17E+03	3,71E+02	1,43E+05	137 %
Cc	4,19E+03	2,03E+03	6,04E+03	3,91E+02	2,13E+05	144 %
Da	3,87E+03	1,93E+03	4,73E+03	3,90E+02	8,54E+04	122 %
Dc	4,44E+03	2,09E+03	5,77E+03	3,19E+02	1,14E+05	130 %

Figura 91 – Variação dos resultados do indicador - Uso do solo.

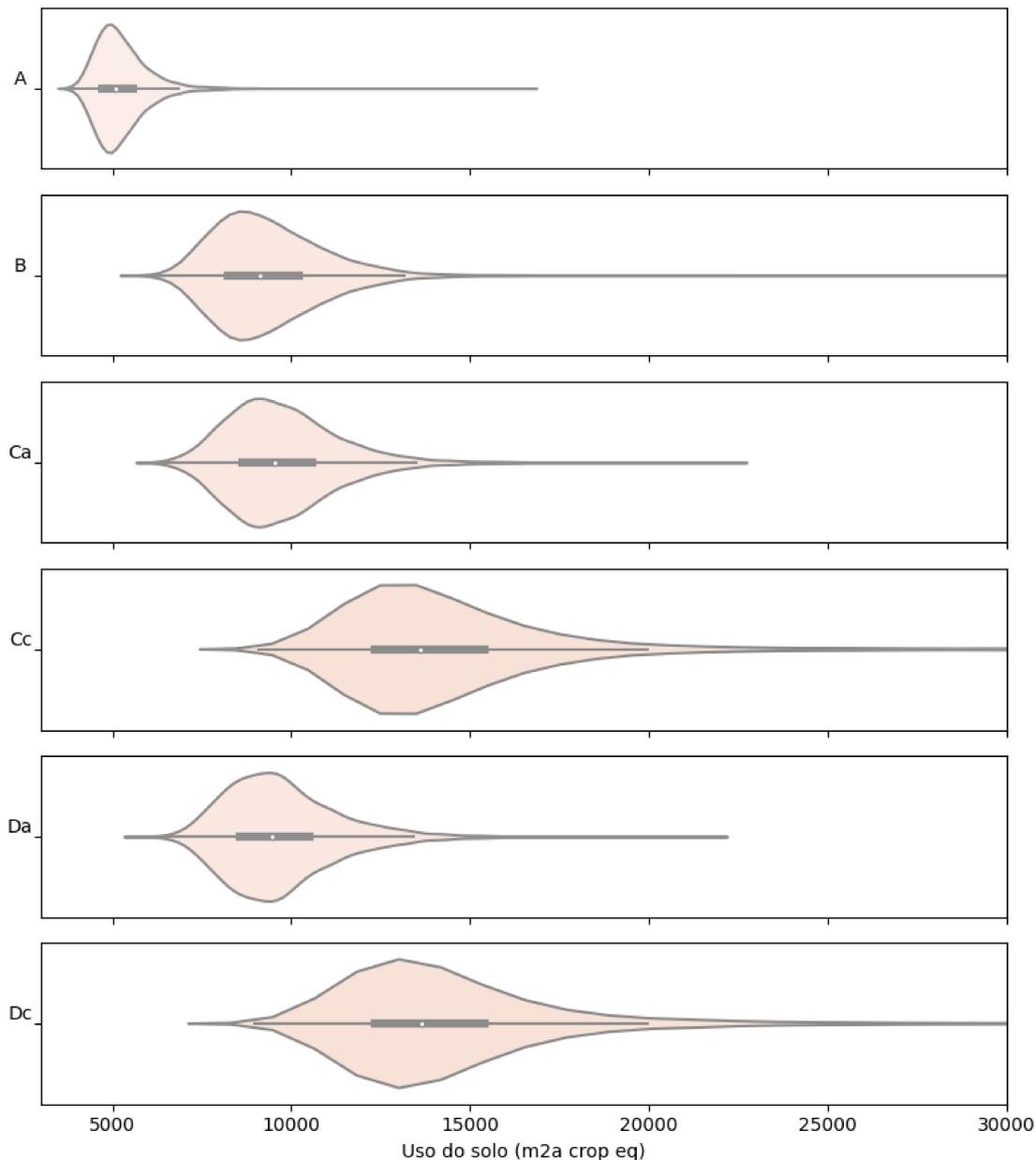


Tabela 29 – Resultados Montecarlo do indicador - Uso do solo.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	5,24E+03	4,44E+03	8,02E+02	3,77E+03	1,66E+04	15 %
B	9,35E+03	8,01E+03	1,58E+03	5,79E+03	3,21E+04	17 %
Ca	9,74E+03	8,38E+03	1,58E+03	6,23E+03	2,21E+04	16 %
Cc	1,45E+04	1,17E+04	4,78E+03	8,59E+03	2,37E+05	33 %
Da	9,70E+03	8,40E+03	1,60E+03	5,90E+03	2,16E+04	16 %
Dc	1,46E+04	1,18E+04	5,08E+03	8,98E+03	1,22E+05	35 %

Figura 92 – Variação dos resultados do indicador - Ecotoxicidade das águas marinhas.

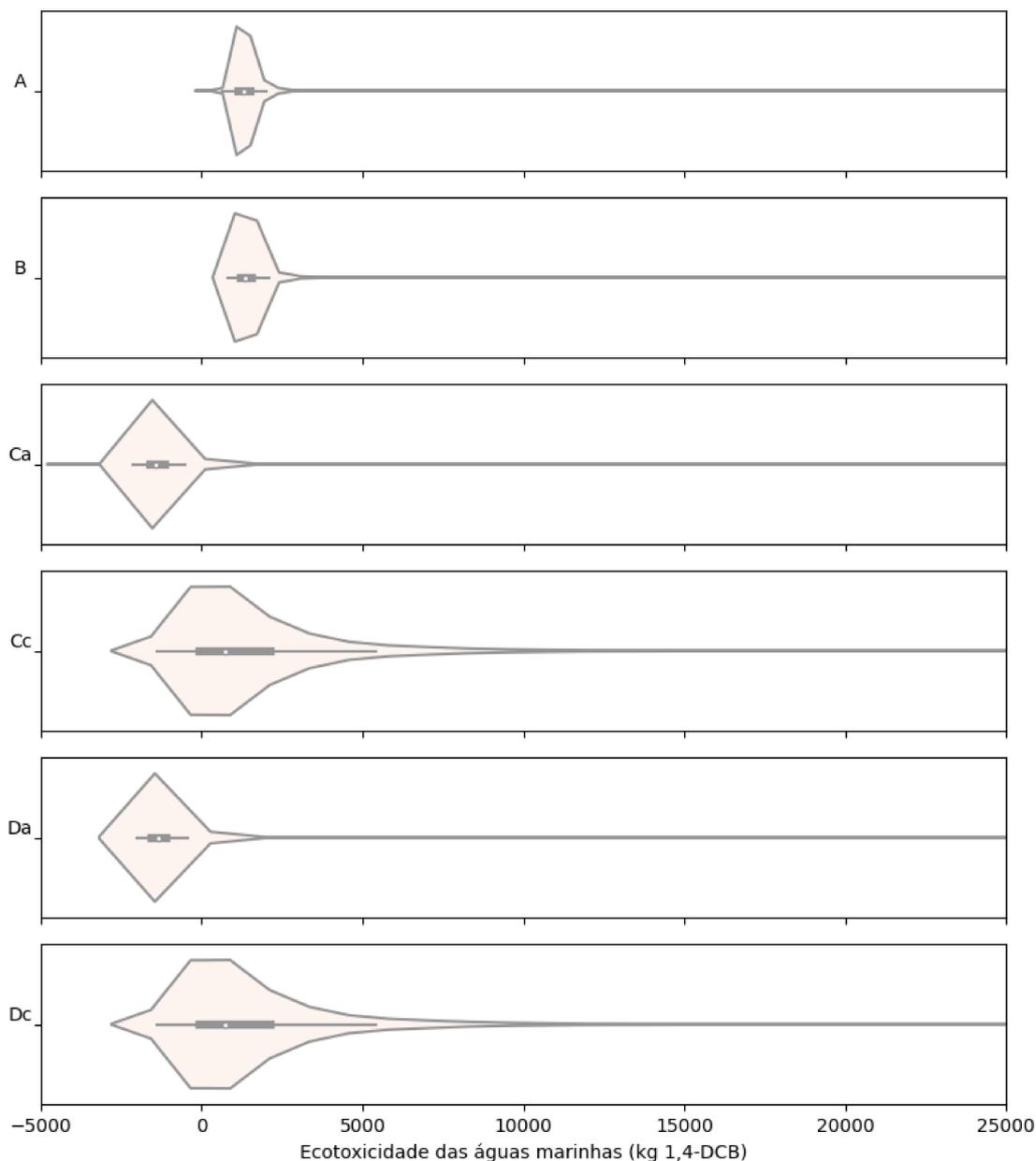


Tabela 30 – Resultados Montecarlo do indicador - Ecotoxicidade das águas marinhas.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	1,40E+03	8,69E+02	8,32E+02	9,35E+01	4,22E+04	60 %
B	1,48E+03	8,63E+02	1,24E+03	7,97E+02	6,79E+04	84 %
Ca	-1,23E+03	-2,02E+03	2,72E+03	-3,82E+03	1,57E+05	-222 %
Cc	1,65E+03	-4,01E+02	1,21E+04	-8,18E+03	1,03E+06	735 %
Da	-1,16E+03	-1,98E+03	3,20E+03	-2,02E+03	1,67E+05	-277 %
Dc	1,64E+03	-3,57E+02	3,84E+03	-1,41E+03	1,18E+05	234 %

Figura 93 – Variação dos resultados do indicador - Eutrofização das águas marinhas.

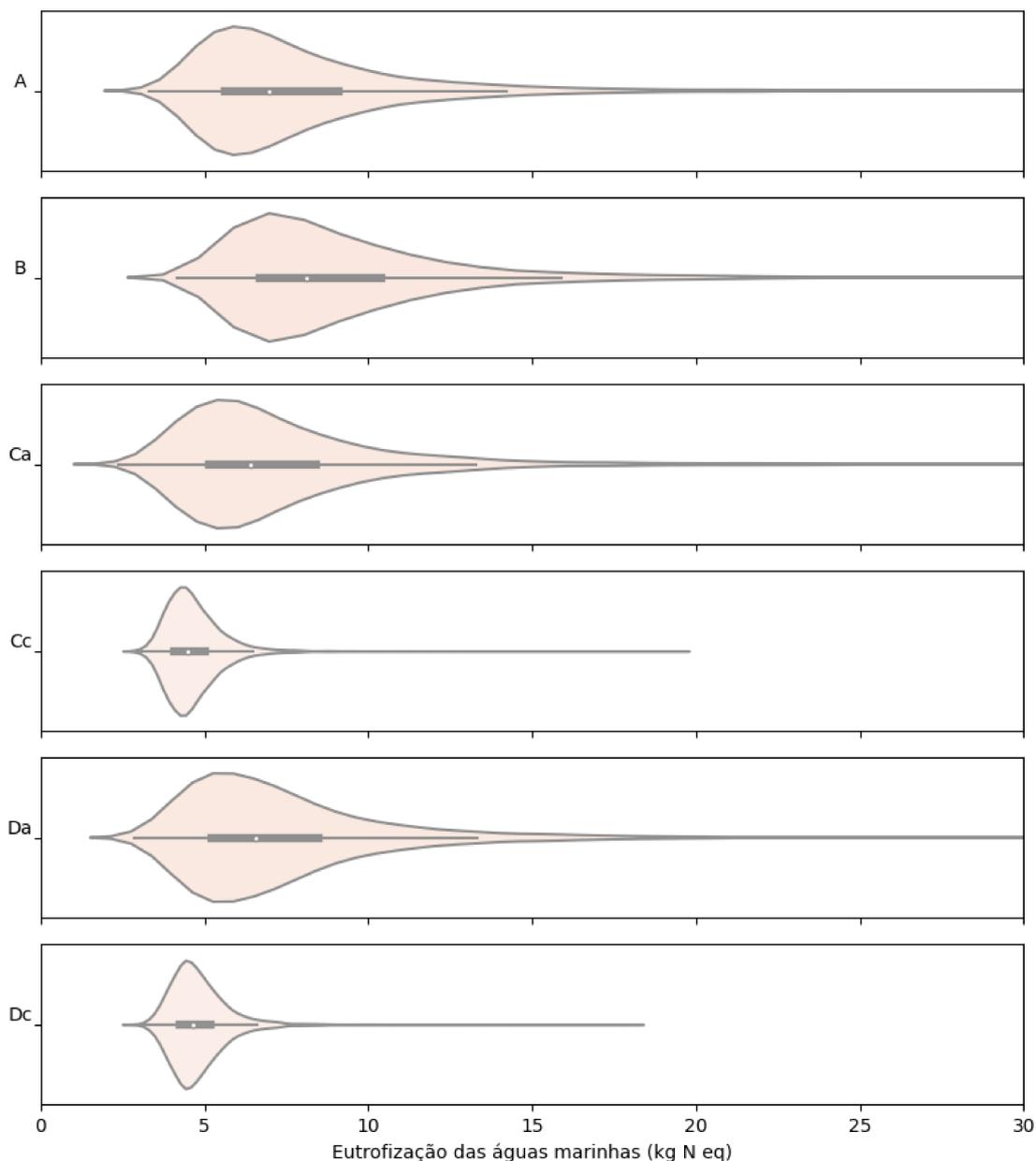


Tabela 31 – Resultados Montecarlo do indicador - Eutrofização das águas marinhas.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	8,00E+00	6,14E+00	3,80E+00	3,32E+00	5,63E+01	47 %
B	9,14E+00	6,86E+00	4,10E+00	4,15E+00	1,08E+02	45 %
Ca	7,37E+00	5,18E+00	3,78E+00	2,38E+00	6,17E+01	51 %
Cc	4,65E+00	3,74E+00	9,20E-01	2,87E+00	2,36E+01	20 %
Da	7,44E+00	5,28E+00	3,63E+00	2,84E+00	6,20E+01	49 %
Dc	4,79E+00	3,84E+00	9,11E-01	2,82E+00	1,81E+01	19 %

Figura 94 – Variação dos resultados do indicador - Depleção de recursos minerais.

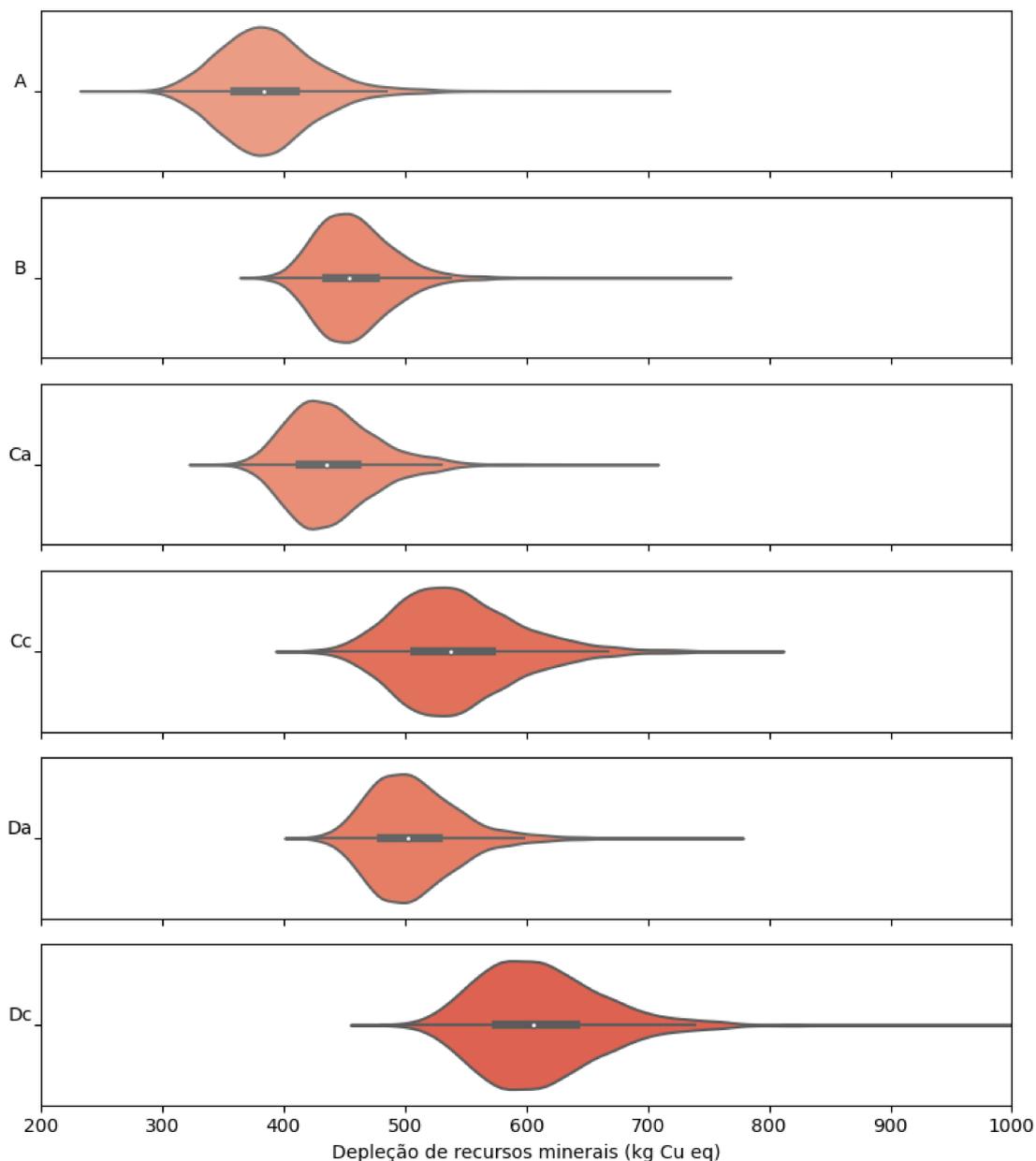


Tabela 32 – Resultados Montecarlo do indicador - Depleção de recursos minerais.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	3,87E+02	3,46E+02	4,03E+01	2,47E+02	7,03E+02	10 %
B	4,58E+02	4,16E+02	3,28E+01	3,76E+02	7,57E+02	7 %
Ca	4,40E+02	3,91E+02	3,85E+01	3,36E+02	6,95E+02	9 %
Cc	5,44E+02	4,74E+02	5,14E+01	4,11E+02	1,14E+03	9 %
Da	5,07E+02	4,57E+02	3,84E+01	4,15E+02	7,65E+02	8 %
Dc	6,12E+02	5,42E+02	5,37E+01	4,75E+02	1,05E+03	9 %

Figura 95 – Variação dos resultados do indicador - Formação de ozônio, Saúde humana.

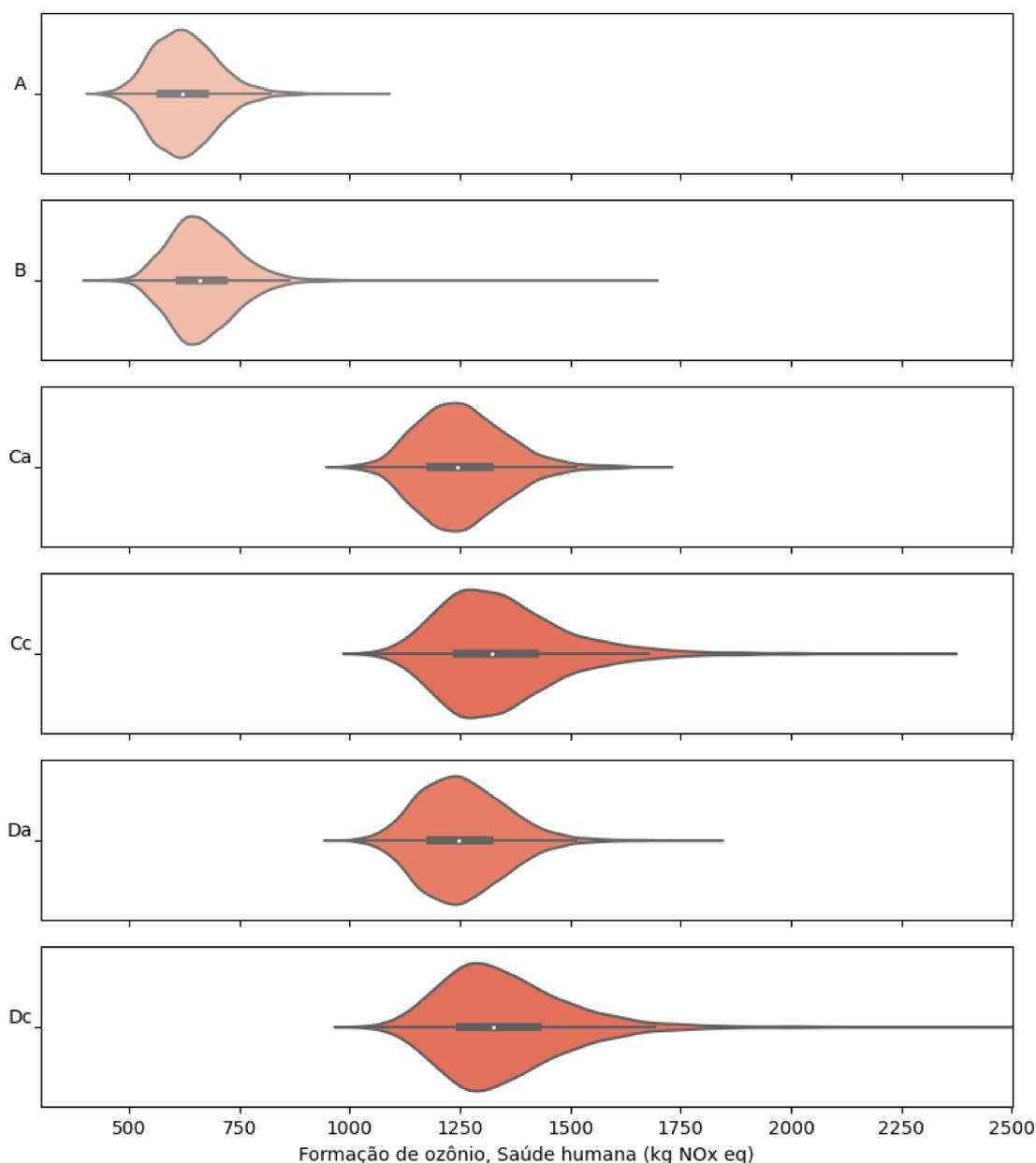


Tabela 33 – Resultados Montecarlo do indicador - Formação de ozônio, Saúde humana.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	6,26E+02	5,75E+02	7,37E+01	4,29E+02	1,06E+03	12 %
B	6,67E+02	6,10E+02	7,86E+01	4,23E+02	1,67E+03	12 %
Ca	1,25E+03	1,19E+03	9,93E+01	9,82E+02	1,69E+03	8 %
Cc	1,35E+03	1,25E+03	1,62E+02	9,96E+02	6,43E+03	12 %
Da	1,25E+03	1,19E+03	9,88E+01	9,77E+02	1,81E+03	8 %
Dc	1,35E+03	1,25E+03	1,49E+02	1,02E+03	2,59E+03	11 %

Figura 96 – Variação dos resultados do indicador - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres.

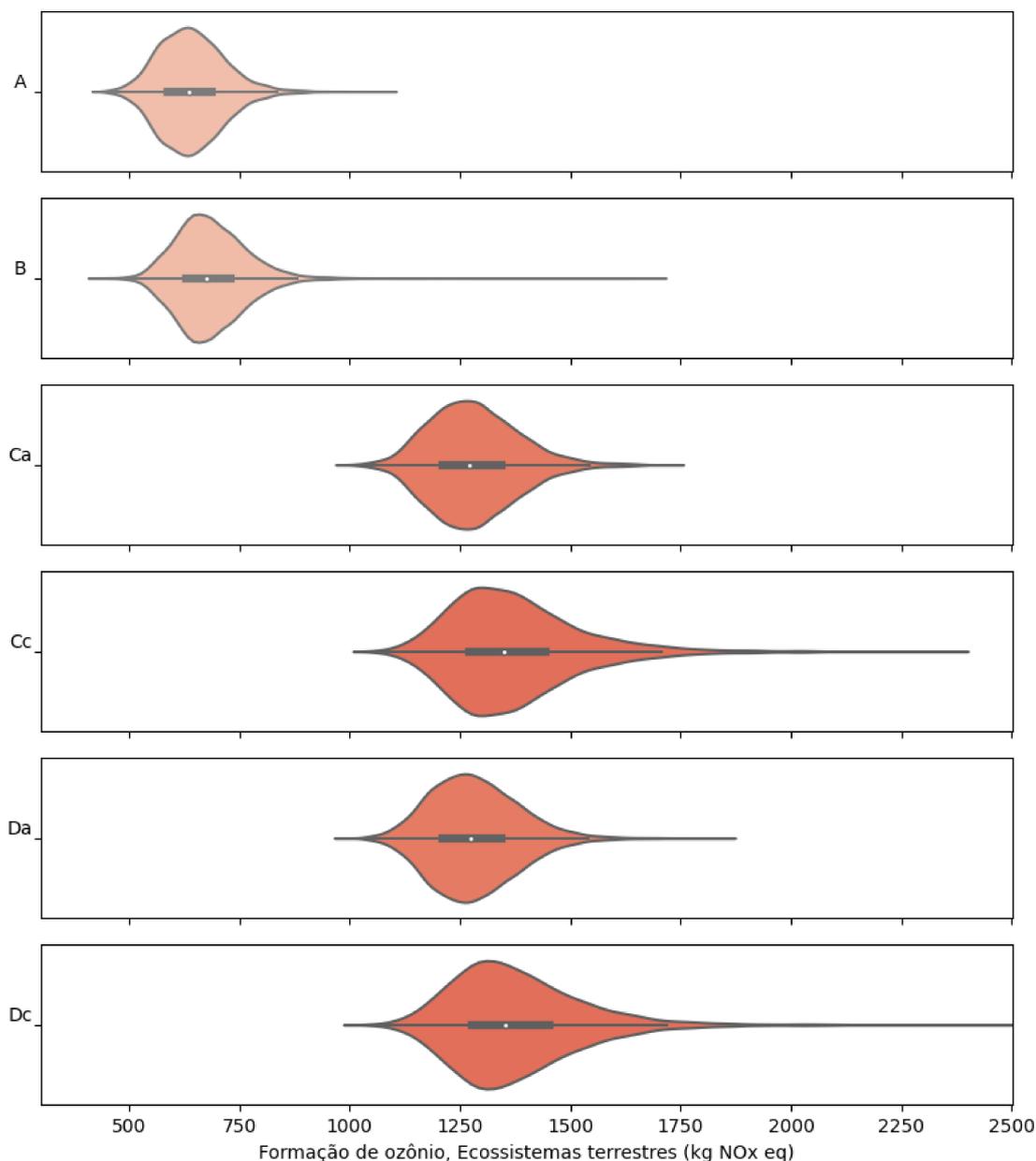


Tabela 34 – Resultados Montecarlo do indicador - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	6,41E+02	5,87E+02	7,42E+01	4,43E+02	1,08E+03	12 %
B	6,83E+02	6,23E+02	7,92E+01	4,36E+02	1,69E+03	12 %
Ca	1,28E+03	1,21E+03	1,00E+02	1,00E+03	1,72E+03	8 %
Cc	1,37E+03	1,27E+03	1,62E+02	1,02E+03	6,51E+03	12 %
Da	1,28E+03	1,22E+03	9,95E+01	1,00E+03	1,84E+03	8 %
Dc	1,38E+03	1,28E+03	1,50E+02	1,04E+03	2,61E+03	11 %

Figura 97 – Variação dos resultados do indicador - Depleção de ozônio na estratosfera.

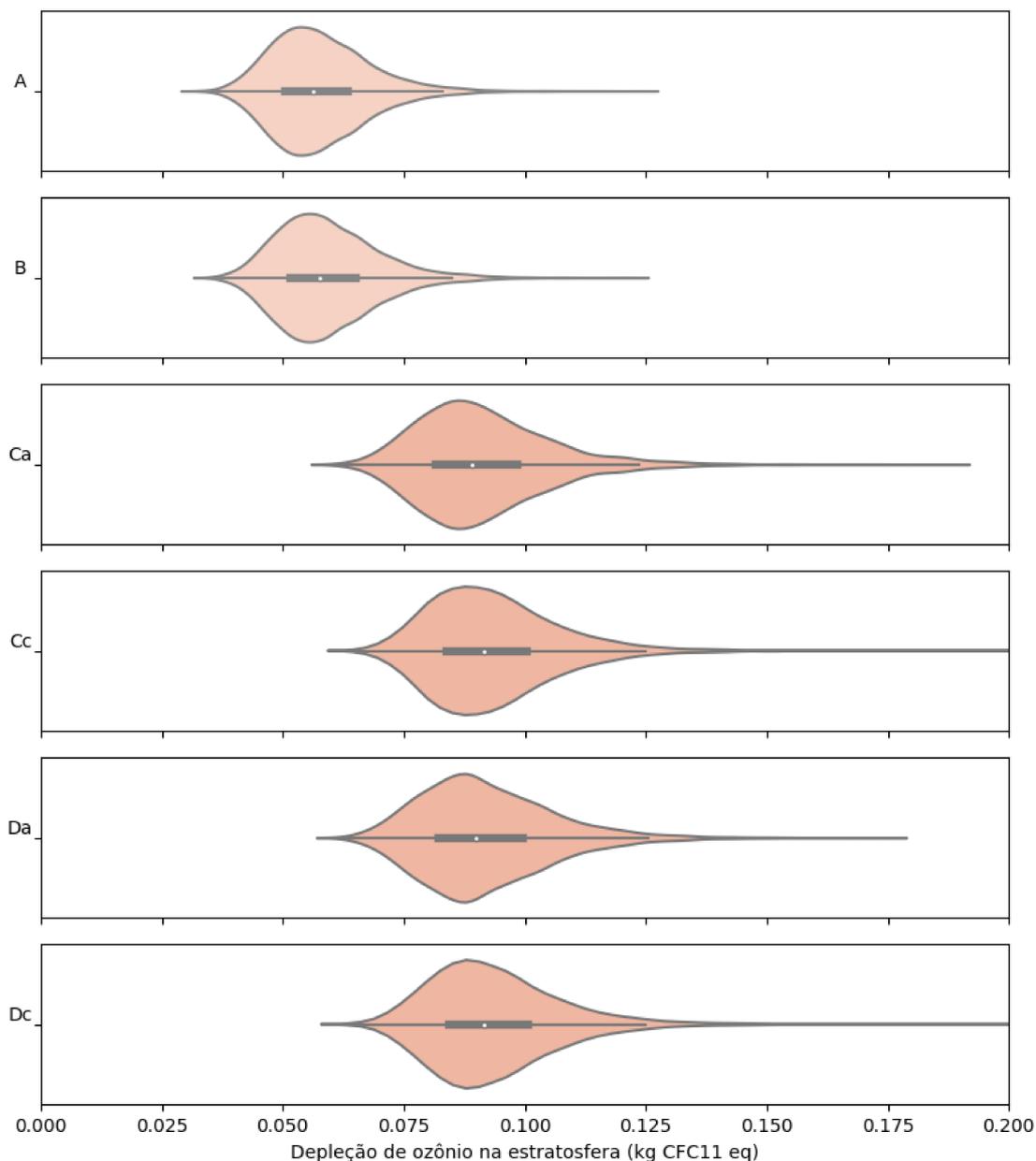


Tabela 35 – Resultados Montecarlo do indicador - Depleção de ozônio na estratosfera.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	5,76E-02	4,91E-02	1,02E-02	3,26E-02	1,24E-01	18 %
B	5,90E-02	4,97E-02	1,05E-02	3,53E-02	1,22E-01	18 %
Ca	9,12E-02	8,04E-02	1,38E-02	6,08E-02	1,87E-01	15 %
Cc	9,35E-02	8,07E-02	1,48E-02	6,20E-02	5,05E-01	16 %
Da	9,18E-02	8,06E-02	1,37E-02	6,19E-02	1,74E-01	15 %
Dc	9,40E-02	8,09E-02	1,55E-02	6,35E-02	3,22E-01	16 %

Figura 98 – Variação dos resultados do indicador - Acidificação dos solos.

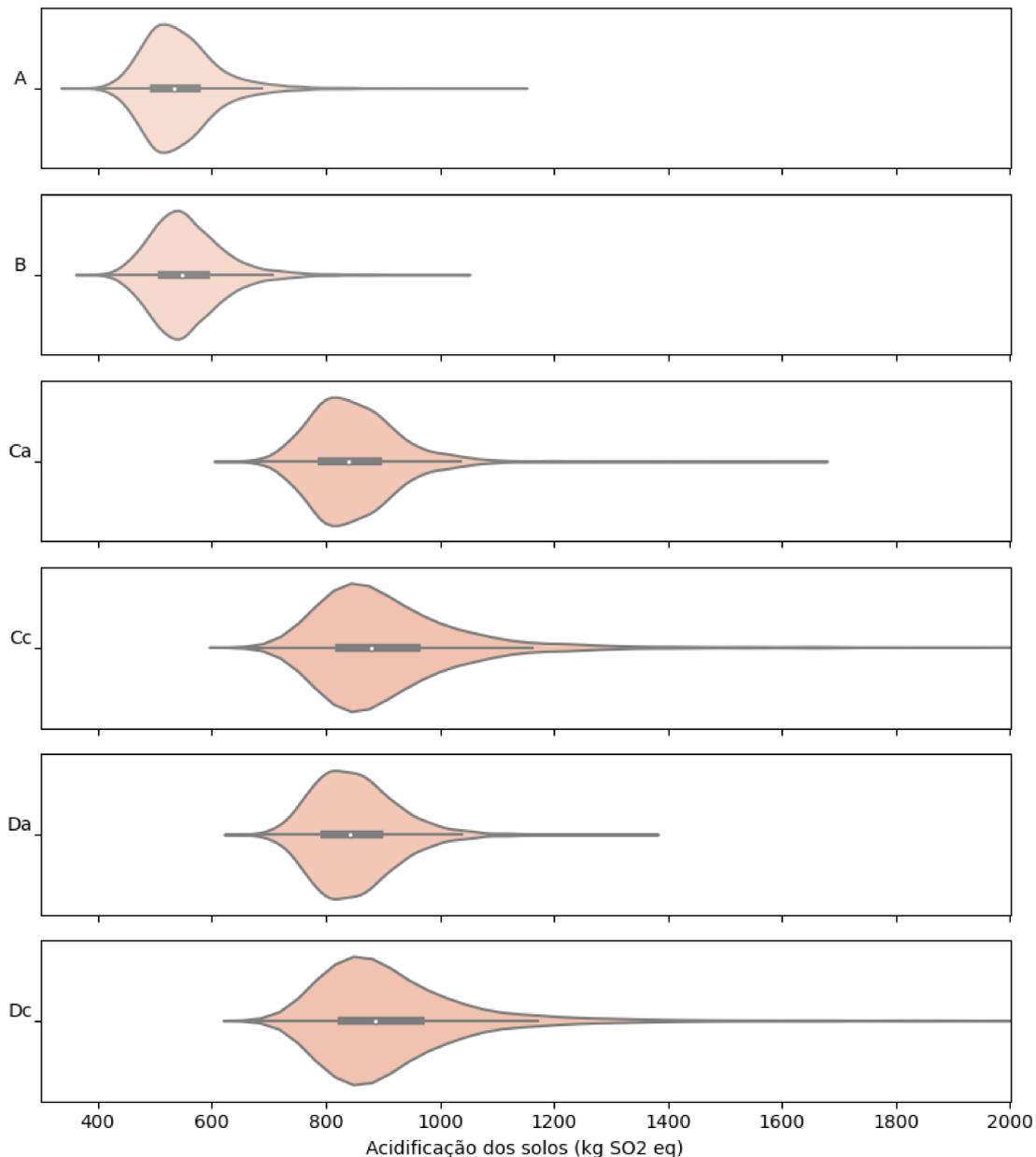


Tabela 36 – Resultados Montecarlo do indicador - Acidificação dos solos.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	5,42E+02	4,83E+02	6,65E+01	3,60E+02	1,13E+03	12 %
B	5,56E+02	4,92E+02	6,62E+01	3,85E+02	1,03E+03	12 %
Ca	8,49E+02	7,76E+02	8,05E+01	6,33E+02	1,65E+03	9 %
Cc	9,11E+02	8,04E+02	1,59E+02	6,60E+02	5,17E+03	17 %
Da	8,51E+02	7,81E+02	7,56E+01	6,49E+02	1,36E+03	9 %
Dc	9,17E+02	8,09E+02	1,54E+02	6,77E+02	3,79E+03	17 %

Figura 99 – Variação dos resultados do indicador - Ecotoxicidade dos solos.

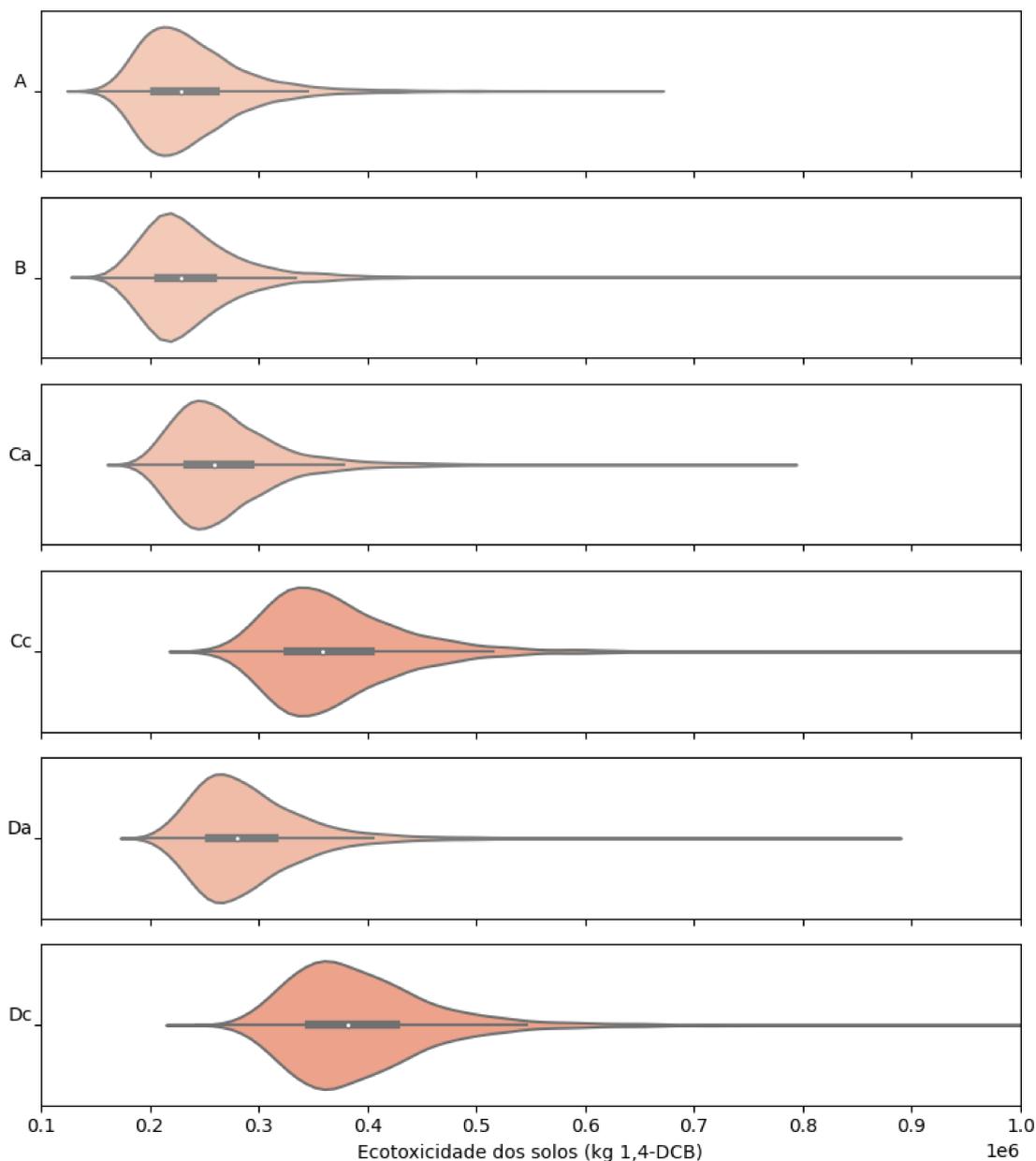


Tabela 37 – Resultados Montecarlo do indicador - Ecotoxicidade dos solos.

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	2,39E+05	1,69E+05	5,08E+04	1,42E+05	6,53E+05	21 %
B	2,39E+05	1,68E+05	5,04E+04	1,46E+05	1,12E+06	21 %
Ca	2,70E+05	1,96E+05	5,27E+04	1,80E+05	7,75E+05	19 %
Cc	3,74E+05	2,76E+05	7,14E+04	2,45E+05	1,64E+06	19 %
Da	2,92E+05	2,11E+05	5,73E+04	1,94E+05	8,69E+05	20 %
Dc	3,96E+05	2,92E+05	7,41E+04	2,42E+05	1,03E+06	19 %

Figura 100 – Variação dos resultados do indicador - Consumo de água (m³).

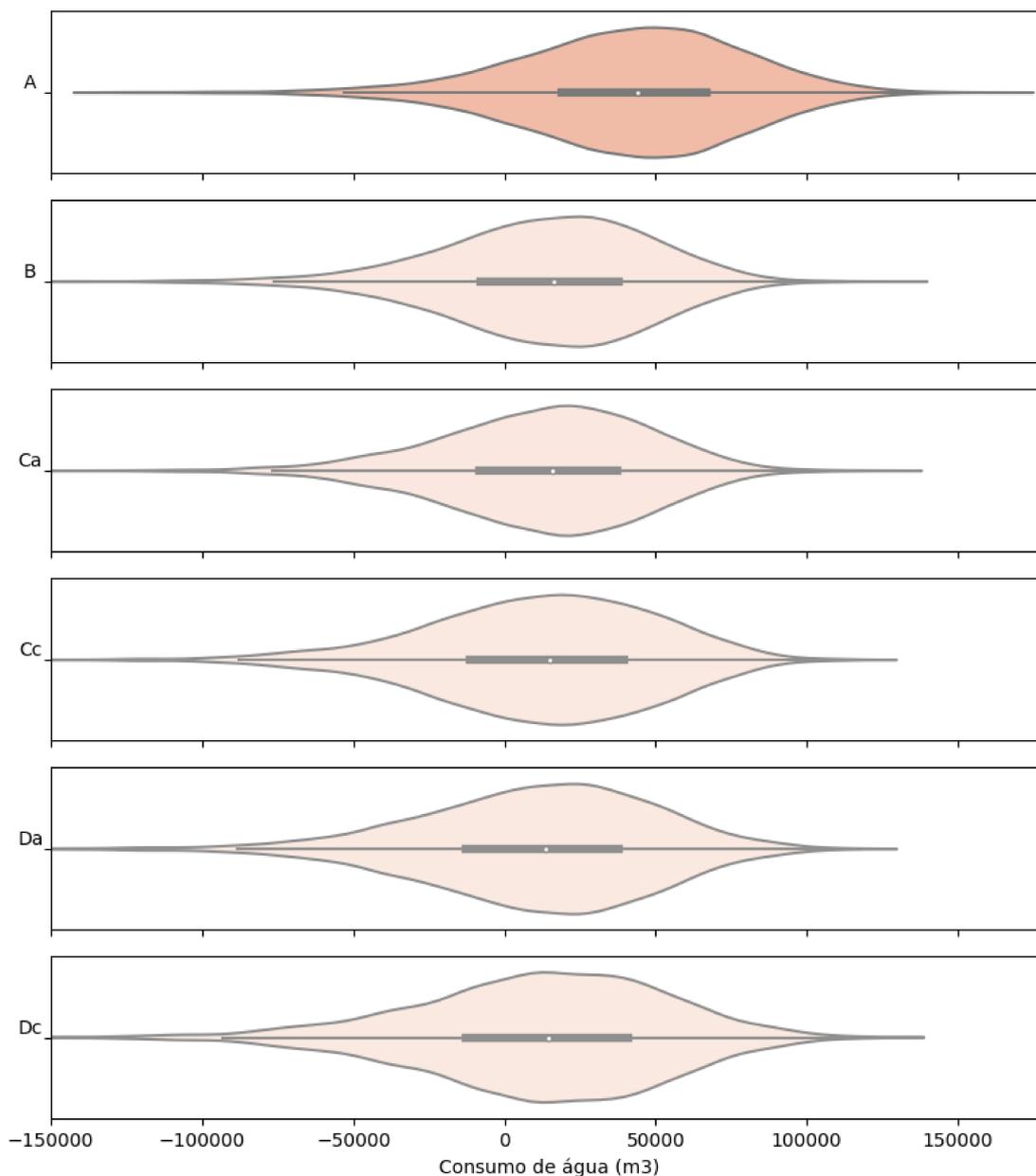


Tabela 38 – Resultados Montecarlo do indicador - Consumo de água (m³).

Cenário	Média	Valor Det.	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
A	4,14E+04	4,64E+04	3,72E+04	-1,29E+05	1,61E+05	90 %
B	1,34E+04	1,82E+04	3,49E+04	-2,01E+05	1,27E+05	260 %
Ca	1,29E+04	1,84E+04	3,47E+04	-1,98E+05	1,25E+05	270 %
Cc	1,28E+04	1,85E+04	3,73E+04	-1,84E+05	1,17E+05	291 %
Da	1,06E+04	1,74E+04	3,88E+04	-1,63E+05	1,16E+05	367 %
Dc	1,16E+04	1,76E+04	4,18E+04	-2,25E+05	1,24E+05	360 %