



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Alexandre Fangier

Avaliação quantitativa de risco microbiológico: Estudo de caso aplicado ao uso de efluentes tratados como água de reúso para fins urbanos em Santa Catarina

Florianópolis

2024

Alexandre Fangier

Avaliação quantitativa de risco microbiológico: Estudo de caso aplicado ao uso de efluentes tratados como águas de reúso para fins urbanos em Santa Catarina

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientador(a): Prof^ª. Dr^ª. Maria Elisa Magri

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Fangier, Alexandre

Avaliação quantitativa de risco microbiológico : Estudo de caso aplicado ao uso de efluentes tratados como águas de reúso para fins urbanos em Santa Catarina / Alexandre Fangier ; orientador, Maria Elisa Magri, 2024.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico. 3. Escherichia coli. 4. Estação de Tratamento de Esgotos. 5. Reúso Urbano. I. Magri, Maria Elisa. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Alexandre Fangier

Avaliação quantitativa de risco microbiológico: Estudo de caso aplicado ao uso de efluentes tratados como águas de reúso para fins urbanos em Santa Catarina

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 16 de dezembro de 2024

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca examinadora

Prof^a. Maria Elisa Magri, Dr.^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng.^a Giulia Birolo Alberton, Msc.^a
Avaliadora
Nova Engevix

Eng.^a Janaina Casado Rodrigues da Silva, Msc.^a
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

*Dedico este trabalho à minha família, por seu carinho e incentivo,
e a meus amigos pelo companheirismo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Edson e Regina, por estarem ao meu lado nos momentos bons, mas principalmente nos momentos em que a presença deles era mais necessária. São as pessoas mais importantes na minha vida.

À minha família, que nunca deixaram que me faltasse amor e carinho em todo esse tempo. Os incentivos que me deram desde pequeno me fazem a pessoa que sou hoje, sou e serei eternamente grato. Sei que estão orgulhosos neste momento.

Aos meus amigos, responsáveis por momentos que fazem com que eu tenha algumas boas histórias para contar. Aos que conheci na faculdade, agradeço o companheirismo e espero que sigam um caminho de sucesso em todos os sentidos. Contem sempre comigo no que precisarem.

À minha orientadora Maria Elisa, por todo apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Aos professores que tive em todo período acadêmico. Foram e sempre serão fonte de inspiração de superação e amor pelo que fazem.

Aos servidores do Departamento, pela atenção e zelo com os alunos.

Aos colegas e amigos que fiz nos estágios, fontes de inspiração e exemplos de profissionais dedicados e receptivos.

Obrigado a todos.

RESUMO

O estudo avaliou os riscos microbiológicos associados ao reúso de efluentes tratados de uma Estação de Tratamento de Esgoto localizada em Florianópolis, SC, considerando diferentes cenários de uso em atividades urbanas. O objetivo foi estimar o risco anual de infecção por *Escherichia coli* patogênica, utilizando a metodologia de Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM), com base em dados históricos da estação. Para isso, foram analisadas as concentrações de *E. coli* no efluente tratado, empregando-se modelagens matemáticas e a Simulação de Monte Carlo para estimar as probabilidades de infecção em diferentes cenários de exposição. A eficiência da ETE na remoção de *E. coli* apresentou mediana de 4,15 unidades \log_{10} , dentro do intervalo esperado para o sistema de tratamento utilizado (UASB + lodos ativados com decantador secundário + desinfecção). Atividades como irrigação de jardins, lavagem de veículos e pisos apresentaram riscos anuais de infecção inferiores ao limite de 0,1% estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS), enquanto o uso de efluentes tratados em descargas sanitárias e irrigação de áreas públicas ultrapassou esse limite, com riscos de 0,195% e 0,116%, respectivamente. A frequência de exposição destacou-se como um dos principais fatores para o aumento do risco em determinados cenários, mesmo quando os volumes ingeridos ou inalados eram baixos. O estudo conclui que o reúso de efluentes tratados é viável e apresenta riscos aceitáveis para a maioria das atividades avaliadas, desde que sejam aplicadas medidas de mitigação em cenários mais críticos, como no uso em descargas sanitárias e irrigação de áreas públicas.

Palavras-chave: Avaliação de risco; *Escherichia coli*; AQRM; Água de reúso.

ABSTRACT

The study evaluated the microbiological risks associated with the reuse of treated effluents from a Wastewater Treatment Plant located in Florianópolis, SC, considering different usage scenarios in urban activities. The objective was to estimate the annual infection risk by pathogenic *Escherichia coli*, using the Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) methodology, based on historical data from the plant. To this end, *E. coli* concentrations in the treated effluent were analyzed, employing mathematical modeling and Monte Carlo Simulation to estimate infection probabilities across different exposure scenarios. The treatment plant's efficiency in removing *E. coli* showed a median of 4.15 log₁₀ units, within the expected range for the treatment system used (UASB + activated sludge with secondary sedimentation + chlorination disinfection). Activities such as garden irrigation, vehicle washing, and floor cleaning presented annual infection risks below the 0.1% limit established by the World Health Organization (WHO), while the use of treated effluents in toilet flushing and public area irrigation exceeded this threshold, with risks of 0.195% and 0.116%, respectively. Exposure frequency emerged as one of the main factors increasing risk in certain scenarios, even when ingested or inhaled volumes were low. The study concludes that the reuse of treated effluents is viable and poses acceptable risks for most evaluated activities, if mitigation measures are applied in more critical scenarios, such as in toilet flushing and public area irrigation.

Keywords: Risk evaluation; *Escherichia coli*; QMRA; Reuse water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: PDF's mais utilizadas em estudos de AQRM para descrever a presença de patógenos em sistemas de reúso de efluentes	25
Figura 2: Metodologia da AQRM	28
Figura 3: Fluxograma da ETE de Florianópolis	30
Figura 4: Série Histórica da Concentração de <i>E. coli</i> no Efluente Bruto e Valores de Referência de Literatura	36
Figura 5: Série Histórica da Concentração de <i>E. coli</i> no Efluente Tratado.....	37
Figura 6: Box Plot com Concentrações de <i>E. coli</i> no Efluente Bruto e Tratado.....	38
Figura 7: Box Plot com Concentrações de <i>E. coli</i> no Efluente Bruto	38
Figura 8: Distribuição de Frequência - Concentração de <i>E. coli</i>	40
Figura 9: Distribuição de Frequência - Concentração de <i>E. coli</i>	41
Figura 10: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade irrigação de jardim, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições. .	42
Figura 11: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade irrigação de jardim, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.	43
Figura 12: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade irrigação de áreas públicas, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.....	44
Figura 13: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade descarga de vaso sanitário, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições.....	45
Figura 14: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade lavagem de veículos, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições. .	46
Figura 15: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade lavagem de veículos, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a	

2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.	46
Figura 16: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade lavagem de pisos, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições. .	47
Figura 17: Curvas de probabilidade de infecção por <i>E. coli</i> patogênica para a atividade lavagem de pisos, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.	48
Figura 18: Valores medianos das curvas de probabilidade de infecção anual por cenário de exposição	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição da exposição relacionada à água de reúso	33
Tabela 2: Estatística descritiva da Concentração de <i>E. coli</i> no Efluente Bruto e Tratado	36
Tabela 3: Unidades \log_{10} de Remoção de <i>E. coli</i> do Efluente Tratado	39
Tabela 4: Resumo dos resultados obtidos para distribuição de probabilidade de infecção anual P(n) relacionados a cada cenário de exposição.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AQRM	Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
D	Número de microrganismos ingerido por exposição (dose)
DALY	<i>Disability adjusted life years</i>
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia Coli</i>
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de tratamento de esgoto
EUA	Estados Unidos da América
h	Hora
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
mL	Mililitros
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número mais provável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
pppa	Por pessoa por ano
SC	Santa Catarina
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
WHO	World Health Organization
α	Parâmetro de forma característico de interação agente-hospedeiro (alfa)
β	Parâmetro de escala característico de interação agente-hospedeiro (beta)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	REÚSO DAS ÁGUAS	21
3.2	RISCO DO REÚSO URBANO DE EFLUENTES TRATADOS.....	21
3.2.1	Coliformes totais, fecais e <i>Escherichia coli</i>	22
3.2.2	Regulamentações sobre reúso de efluentes tratados	23
3.3	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO	24
3.3.1	Identificação do perigo	24
3.3.2	Avaliação da exposição	24
3.3.3	Modelo dose-resposta	26
3.3.3.1	<i>Beta-Poisson</i>	26
3.3.4	Caracterização do risco	27
4	METODOLOGIA	29
4.1	DADOS ANALISADOS	29
4.2	REMOÇÃO DE <i>E. COLI</i> PELA ETE AVALIADA.....	31
4.3	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO	31
4.3.1	Identificação do Perigo	31
4.3.2	Avaliação da Exposição	32
4.3.2.1	<i>Determinação da Concentração de E. coli no Efluente Tratado</i>	32
4.3.2.2	<i>Volume Ingerido por Atividade e Rota de Exposição</i>	32
4.3.3	Modelo dose-resposta	33
4.3.4	Caracterização do risco	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	CONCENTRAÇÃO DE <i>E. COLI</i> NO EFLUENTE BRUTO E TRATADO E EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	36
5.2	AVALIAÇÃO DE RISCO MICROBIOLÓGICO	40
5.2.1	Determinação da Distribuição de Frequência de <i>E. coli</i> no Efluente Tratado .	40
5.2.2	Cenário 1 - Irrigação de Jardim (Aerossol)	41
5.2.3	Cenário 2 - Irrigação de Jardim (Exposição Rotineira)	42

5.2.4	Cenário 3 - Irrigação de Áreas Públicas (Exposição Rotineira)	43
5.2.5	Cenário 4 - Vaso Sanitário (Aerossol).....	44
5.2.6	Cenário 5 - Lavagem de Veículos (Aerossol).....	45
5.2.7	Cenário 6 - Lavagem de Veículos (Exposição Rotineira).....	46
5.2.8	Cenário 7 - Lavagem de Pisos (Aerossol)	47
5.2.9	Cenário 8 - Lavagem de Pisos (Exposição Rotineira)	47
5.3	RESUMO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO.....	48
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	52
	REFERÊNCIAS.....	54
	APÊNDICE A – CONCENTRAÇÕES DE ESCHERICHIA COLI – ETE DE FLORIANÓPOLIS.....	57
	APÊNDICE B – CONCENTRAÇÕES DE ESCHERICHIA COLI PATOGÊNICA (8% DO TOTAL).....	61

1 INTRODUÇÃO

A água é recurso natural fundamental à vida humana e ao meio ambiente, sendo provida de valor econômico e social. Entretanto, uma pequena parte é considerada água disponível para consumo, apresentando distribuição irregular na crosta terrestre. Sua disponibilidade está diretamente relacionada ao crescimento populacional, grau de urbanização e aos seus usos. Além disso, a mudança climática tem alterado significativamente o ciclo hidrológico, o que adiciona uma incerteza significativa à disponibilidade hídrica em muitas regiões do planeta, tanto no presente, mas principalmente no futuro (IPCC, 2013).

Essa realidade destaca a necessidade urgente de repensar as práticas de saneamento. Os avanços científicos e tecnológicos têm melhorado a saúde pública, mas apenas tratar efluentes e descartá-los no ambiente já não é suficiente. É essencial adotar uma abordagem mais integrada e sustentável, que leve em conta o equilíbrio entre desenvolvimento e preservação dos recursos hídricos, garantindo sua disponibilidade para as gerações atuais e futuras.

Para garantir o acesso aos recursos hídricos dessa e das próximas gerações é necessário repensar alguns usos que se faz da água tratada. O reúso de efluentes tratados em usos ditos “menos nobres”, os quais não necessitam água de alta qualidade ou potabilidade, é uma alternativa levada muito em conta atualmente. Para isso, os riscos associados à exposição rotineira ou acidental devem ser considerados para que se possa estabelecer práticas seguras, já que as águas de reúso podem apresentar patógenos, como: vírus (norovírus, rotavírus, adenovírus, enterovírus e coronavírus), bactérias (*E.coli* patogênica, *Salmonella spp.*, *Vibrio cholerae* e *Clostridium difficile*), protozoários (*Giardia intestinalis*, *Cryptosporidium spp.*, *Entamoeba histolytica* e *Toxoplasma gondii*) e helmintos (*Ascaris lumbricoides*, ancilostomídeos, *Taenia spp.* e *Schistosoma mansoni*) (MAY, 2009).

A eliminação completa de todos os riscos de contaminação é o pressuposto fundamental do conceito de “risco zero”, o qual é caracterizado pela ausência de organismos indicadores ou patógenos na água de reúso. Porém este é criticado devido à sua fragilidade em termos de fundamentação epidemiológica (BLUMENTHAL et al., 2000; CARR; BLUMENTHAL; MARA, 2004). Além disso, tal abordagem requer tratamentos complexos e muito custosos, diminuindo a viabilidade econômica do reúso dessas águas.

A Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM) é considerada ferramenta essencial para avaliar a sustentabilidade do reúso das águas em território nacional. Essa metodologia tem como objetivo estimar os efeitos à saúde humana decorrentes da exposição a microrganismos infecciosos em diferentes cenários, sendo bastante útil para determinar padrões

microbiológicos nas águas de reúso, baseados nos riscos ao desenvolvimento de doenças de veiculação hídrica (HAAS; ROSE; GERBA, 2014).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece, para doenças diarreicas de veiculação hídrica um risco aceitável (ou tolerável, na terminologia da OMS) de 10^{-3} pppa (por pessoa por ano), ou 0,1% de risco de infecção por ano (WHO, 2008). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar quantitativamente os riscos microbiológicos de possíveis exposições de pessoas a água proveniente de efluente tratado de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) de Florianópolis, SC, a fim de averiguar a viabilidade de empregá-la como água de reúso em usos urbanos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar quantitativamente o risco microbiológico associado ao uso de efluentes tratados de uma Estação de Tratamento de Florianópolis, Santa Catarina, como água de reúso em diferentes atividades urbanas, utilizando a parcela patogênica da *Escherichia coli* como agente patogênico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos contemplados pelo presente trabalho são:

- i. Avaliar o potencial de remoção microbiológica de uma ETE do município de Florianópolis, SC, por meio do indicador *Escherichia coli*.
- ii. Aplicar a metodologia AQRM para caracterizar os riscos de infecção anual por *E. coli* patogênica na utilização dos efluentes tratados por reúso urbano e rota de exposição, tendo como base os padrões de risco aceitável pela OMS;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REÚSO DAS ÁGUAS

Os recursos hídricos estão fortemente conectados com o desenvolvimento econômico, social e ambiental dos países. Com o avanço das sociedades modernas, houve um aumento das necessidades por recursos hídricos, tornando os sistemas hídricos cada vez mais complexos (ANA, 2024a). Além da má distribuição e poluição, a demanda excessiva de recursos hídricos propicia ainda mais escassez de água em algumas regiões.

Com a pressão crescente sobre os recursos hídricos, o reúso da água pode contribuir com a sustentabilidade dos recursos hídricos, promovendo o aumento da oferta de água para outros usos e a redução do aporte de cargas poluidoras aos mananciais. Em regiões com elevada escassez hídrica, onde a disponibilidade de água é limitada e a capacidade de diluição é reduzida, o reúso torna-se ainda mais relevante como parte das estratégias de eficiência e uso racional dos recursos hídricos (ANA, 2024b).

Embora o reúso da água seja uma prática mais que centenária, apenas recentemente foram-se consolidando as bases técnicas e científicas para o “reúso controlado” (BASTOS et al., 2008). Os exemplos de reúso em todo o mundo vão desde sistemas rigidamente controlados por diretrizes governamentais, com elevados níveis de planejamento, até as iniciativas espontâneas, as quais podem vir a acarretar sérios riscos à saúde (BLUMENTHAL et al., 2000; SCOTT et al., 2004).

Conforme o “Manual de Reúso de Água” da EPA (USEPA, 2004), o reúso urbano abrange os usos não potáveis em áreas urbanas, como: irrigação de parques públicos e centros de recreação, jardins de escolas, residências e campos de futebol, uso comercial com lavagem de veículos, de janelas, águas de mistura para pesticidas, herbicidas e fertilizantes líquidos; uso em jardins ornamentais e decorativos; controle de poeira e produção de concreto em projetos construtivos; águas de combate a incêndios; descargas em bacias sanitárias em banheiros comerciais e industriais; irrigação de áreas de acesso restrito.

3.2 RISCO DO REÚSO URBANO DE EFLUENTES TRATADOS

Segundo Cunha (2008), um dos perigos associados ao reúso urbano de efluentes tratados é a possibilidade de contaminação dos usuários e operadores do sistema. A preocupação com a saúde pública relacionada aos usos possíveis está relacionada com doenças

de veiculação hídrica causadas por microrganismos patogênicos através do contato com a pele, inalação no caso de aspersão, ingestão indireta ou até direta acidental.

Os esgotos sanitários podem conter os mais variados organismos patogênicos e em concentrações elevadas, como bactérias (*Escherichia coli* e *Salmonella*), que podem causar gastroenterites severas (SILVA et al., 2014); protozoários, como *Giardia lamblia* e *Entamoeba histolytica*, que estão relacionados a diarreias persistentes (SANTOS et al., 2016); helmintos, como *Ascaris lumbricoides*, o qual pode causar infecções intestinais, e *Schistosoma mansoni*, relacionado a doença esquistossomose (ROCHA et al., 2000); e vírus como adenovírus humano, enterovírus, norovírus e rotavírus, associados a doenças respiratórias e gastroenterites severas (SCHLINDWEIN et al., 2010).

Assim, embora o reúso de efluentes possa ser viável em várias situações, torna-se essencial estabelecer padrões rigorosos de tratamento que garantam segurança sanitária. Contudo, ainda há controvérsias quanto à definição dos padrões de qualidade dos efluentes e do grau de tratamento necessário (BASTOS et al., 2008).

3.2.1 Coliformes totais, fecais e *Escherichia coli*

Os coliformes totais representam uma grande variedade de bactérias aeróbias e anaeróbias facultativas, capazes de fermentar lactose com produção de gás dentro de 24 horas, com temperatura variando de 35 a 37°C (WHO, 2017). São organismos que podem sobreviver e se reproduzir na água e incluem tanto as bactérias que se encontram no ambiente quanto bactérias presentes nas fezes.

Dentro do grupo dos coliformes totais estão os coliformes termotolerantes, também conhecidos como coliformes fecais. Estes microrganismos, caracterizados pela presença da enzima beta-galactosidase e pelo risco à saúde humana (CONAMA, 2000), são excretados em elevadas quantidades nas fezes, e a presença destes organismos no meio aquático pode indicar a contaminação por efluentes domésticos (BRASIL, 2006). Segundo Soares (1999), cerca de 90% das bactérias presentes no grupo de coliformes fecais são *Escherichia coli*, sendo este o coliforme fecal mais significativo.

A *E. coli* é geralmente utilizada como indicador das condições ambientais em meios aquáticos (HSU et al., 2007). Estas bactérias, assim como o grupo de coliformes fecais, são consideradas bioindicadores clássicos da presença de contaminação fecal da água. Porém a ausência destes não exclui a possibilidade de existir contaminação viral no meio, conforme apontam vários estudos (GRIFFIN et al., 2008; TAVARES et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2002).

Algumas cepas de *Escherichia coli* podem ser patogênicas, como a *E. coli* enteropatogênica (EPEC), *E. coli* enterotoxigênica (ETEC), *E. coli* enterohemorrágica (EHEC) e a *E. coli* enteroinvasiva (EIEC). Estes microrganismos podem causar diarreia, acompanhada de vômito e desidratação, podendo ser fatal principalmente em crianças (HAAS et al., 2014). É importante destacar que, segundo a OMS (2016), as parcelas patogênicas de *E. coli* representam 8% do total deste microrganismo presente em ambientes aquáticos.

Ainda de acordo com a OMS (2008), para doenças diarreicas transmitidas pela água, como a infecção por *E. coli* patogênica, é considerado um risco aceitável (ou tolerável) quando a probabilidade de ocorrência é de 1 pessoa a cada 1000 por ano (ou 10^{-3} pppa).

3.2.2 Regulamentações sobre reúso de efluentes tratados

A regulamentação do reúso da água para diversos fins é observada em vários países, os mais distintos em termos de características socioeconômicas e localização geográfica, a exemplo dos EUA, México, Arábia Saudita, Japão, Austrália, Tunísia, Peru, Alemanha, África do Sul, Chipre, Israel, Kwait e China (BLUMENTHAL et al., 2000; USEPA, 2004).

A regulação de diferentes modalidades de reúso urbano da água já é feita em alguns Estados brasileiros, como Ceará (Lei Nº 16.0033/2016), Rio de Janeiro (Decreto Nº 47.403/2020), São Paulo (Resolução Conjunta SES/SMS/SSRH Nº 1/2017) e Minas Gerais (Deliberação Normativa nº 65/2020). Ainda não há legislações específicas para Florianópolis a nível municipal ou Santa Catarina a nível estadual. Em termos nacionais, no âmbito do Novo Marco Legal do Saneamento, foi conferida à ANA a atribuição de estabelecer normas de referência para reúso dos efluentes sanitários tratados, em conformidade com as normas ambientais e de saúde pública (ANA, 2024b).

A NBR 13.969/1997, a qual estabelece os requisitos e diretrizes para a construção e funcionamento de unidades de pós-tratamento de tanques sépticos, também aborda o planejamento do sistema de reúso, usos previstos para esgoto tratado, treinamento dos responsáveis, volume de esgoto e seu grau de tratamento, sistema de distribuição e reservatório para esgoto doméstico ou similares com fins não-potáveis, como: lavagens de pisos e veículos, irrigação de jardins e de campos agrícolas, descarga de vasos sanitários, pastagens, manutenções paisagísticas dos lagos e canais com água, entre outros (ABNT, 1997).

3.3 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO

A avaliação quantitativa de risco microbiológico é uma metodologia que aplica os princípios da avaliação de risco para estimar a consequência da exposição à microrganismos patogênicos na saúde humana (HAAS; ROSE; GERBA, 2014). O risco pode ser estimado através da concentração do organismo patogênico no meio, doses de ingestão e modelos de dose-resposta para cada patógeno.

Essa ferramenta tem sido incorporada aos estudos dos possíveis impactos na saúde pública decorrentes do reúso e, de forma conjunta aos estudos epidemiológicos clássicos, tem proporcionado novas possibilidades de identificação e/ou estimativa do risco atribuível a essa prática (BLUMENTHAL et al., 2000; PETERSON e ASHBOLT, 2002; MARA et al, 2007).

A metodologia utilizada na AQRM pode ser subdividida em quatro etapas, descritas nos subitens a seguir.

3.3.1 Identificação do perigo

A primeira etapa da AQRM consiste em identificar os potenciais agentes microbiológicos e as doenças e efeitos adversos que estes agentes podem gerar na saúde humana (HAAS; ROSE; GERBA, 2014). Estas informações são obtidas a partir de estudos microbiológicos encontrados na literatura. Informações importantes e que devem ser coletadas nesta etapa são:

- ✓ Patogenicidade
- ✓ Virulência
- ✓ Resistência
- ✓ Vias de transmissão
- ✓ Comportamento do agente no seu hospedeiro e sua relevância no âmbito da saúde pública

3.3.2 Avaliação da exposição

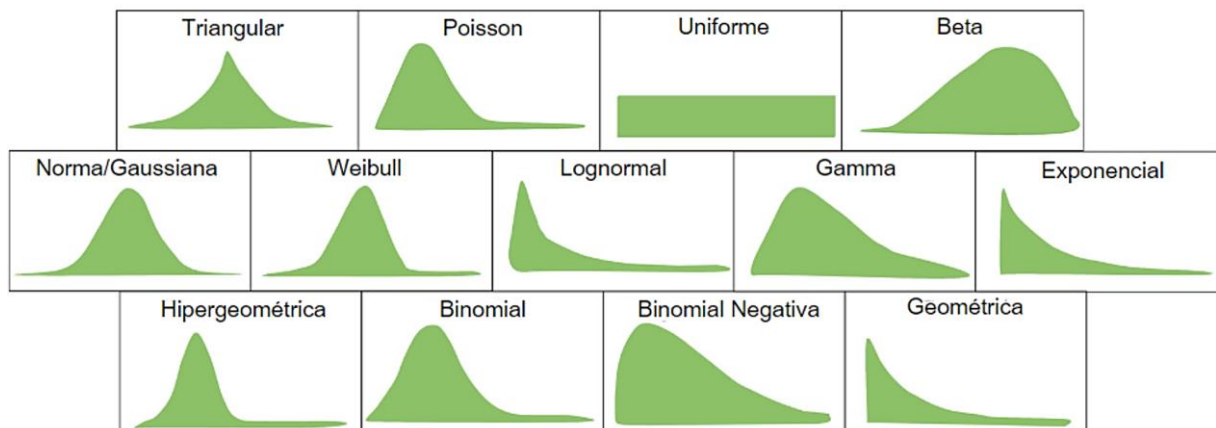
Avaliar a exposição significa determinar as características da população suscetível ao perigo identificado na primeira etapa. Esta etapa deve determinar a natureza da população exposta (crianças ou imunocomprometidos, por exemplo), como também a abrangência dessa exposição (tamanho da população). A duração da exposição, rotas de contaminação e a

distribuição de agentes microbiológicos também são informações obtidas nesta etapa (HAAS; ROSE; GERBA, 2014).

O ponto de origem pode ser representado por um único valor de concentração, como a média ou a mediana em modelos determinísticos, ou, em modelos estocásticos, por uma função de distribuição de probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*). A PDF descreve, no modelo, a faixa de valores esperados e suas respectivas probabilidades de ocorrência, refletindo a variabilidade do parâmetro. A concentração de patógenos pode oscilar devido a diversos fatores, como falhas no sistema de tratamento, surtos de doenças ou eventos extremos, como chuvas intensas.

A Figura 1 apresenta as PDF's mais utilizadas em estudos de AQRM para descrever a presença de patógenos em sistemas de reúso de efluentes, conforme artigo de revisão de literatura realizado por Zhiteneva et al (2020).

Figura 1: PDF's mais utilizadas em estudos de AQRM para descrever a presença de patógenos em sistemas de reúso de efluentes



Fonte: Adaptado de Zhiteneva et al (2020)

Como os dados de monitoramento de efluentes apresentam limite inferior igual a zero, porém não possuem limites superiores fixos, é teoricamente esperado que as distribuições tenham uma assimetria positiva. Para identificar qual a distribuição melhor se adequa a uma série de dados é possível recorrer a métodos gráficos, como gráficos de probabilidade, em inglês *probability-probability plots*, ou utilizar de testes de aderência como o Qui-Quadrado, Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD), entre outros (WHO, 2016; ZHITENEVA et al., 2020).

A Equação 4 pode ser usada para calcular a dose do agente microbiológico ingerida durante a atividade relacionada:

$$D = V * C \quad (1)$$

Onde:

D: dose do patógeno ingerida.

V: volume de água de reúso ingerido.

C: concentração de patógenos registrada.

Os indivíduos expostos podem se contaminar por meio de aerossóis, pela pele e mucosas ou pela da ingestão acidental, sendo esta última, na maioria dos casos, decorrente de conexão cruzada entre água potável e água de reúso (MANCUSO et al., 2003).

Segundo Cohim e Kiperstok (2007), a exposição é definida pela magnitude e frequência de exposição associada ao uso, intencional ou não, da água de reúso. Por sua vez, Ashbolt et al. (2005) define a exposição através da associação dos parâmetros: volume, rota de exposição e frequência.

3.3.3 Modelo dose-resposta

A terceira etapa da AQRM pode ser considerada como a mais importante, tendo como objetivo estimar a resposta na saúde de um indivíduo a partir da ingestão de uma dose conhecida do agente patogênico. A base desta etapa consiste no uso de modelos matemáticos e diferentes parâmetros que representam o comportamento de cada microrganismo (HAAS; ROSE; GERBA, 2014). Atualmente, diversos estudos indicam os modelos de dose-resposta mais adequados para diferentes microrganismos. A escolha do modelo correto é fundamental para garantir a eficácia e a precisão na avaliação de risco.

O resultado dos modelos é a probabilidade de resposta (infecção ou doença) no indivíduo. A seguir é apresentado o modelo Beta-Poisson, sendo o mais indicado para a avaliação de risco para infecção por *E. coli*.

3.3.3.1 Beta-Poisson

O modelo Beta-Poisson assume que a probabilidade de infecção para alguns agentes patogênicos e hospedeiros humanos pode variar, sendo que esta variação acontece tanto por características do indivíduo quanto do patógeno. Neste modelo o parâmetro constante *r* do modelo exponencial é regido por uma distribuição de probabilidade representada pelos

coeficientes α e β , os quais são específicos para cada microrganismo. O modelo é representado pela Equação 2:

$$P(i) = 1 - \left(1 + \frac{D}{\beta}\right)^{-\alpha} \quad (2)$$

Onde:

$P(i)$: risco de infecção de um indivíduo durante uma única exposição.

D : dose do patógeno ingerida.

α : parâmetro de forma característico de interação agente-hospedeiro (alfa).

β : parâmetro de escala característico de interação agente-hospedeiro (beta).

3.3.4 Caracterização do risco

Caracterizar o risco consiste em integrar todos os resultados obtidos até esta etapa, e com estes dados, interpretar o risco existente. Esta análise inclui a estimativa quantitativa do risco, assim como as incertezas presentes. As incertezas podem estar relacionadas ao modelo escolhido, aos dados de concentração obtidos em laboratório e ao volume de água ingerido (HAAS; ROSE; GERBA, 2014).

Também deve-se levar em conta a frequência de exposição às atividades. Após a aplicação do modelo dose-resposta e, considerando o risco de infecção em uma única exposição, é possível determinar o risco para períodos maiores, ou seja, para múltiplas exposições durante o período de um ano, conforme mostra a Equação 3:

$$P(n) = 1 - (1 - P(i))^n \quad (3)$$

Onde:

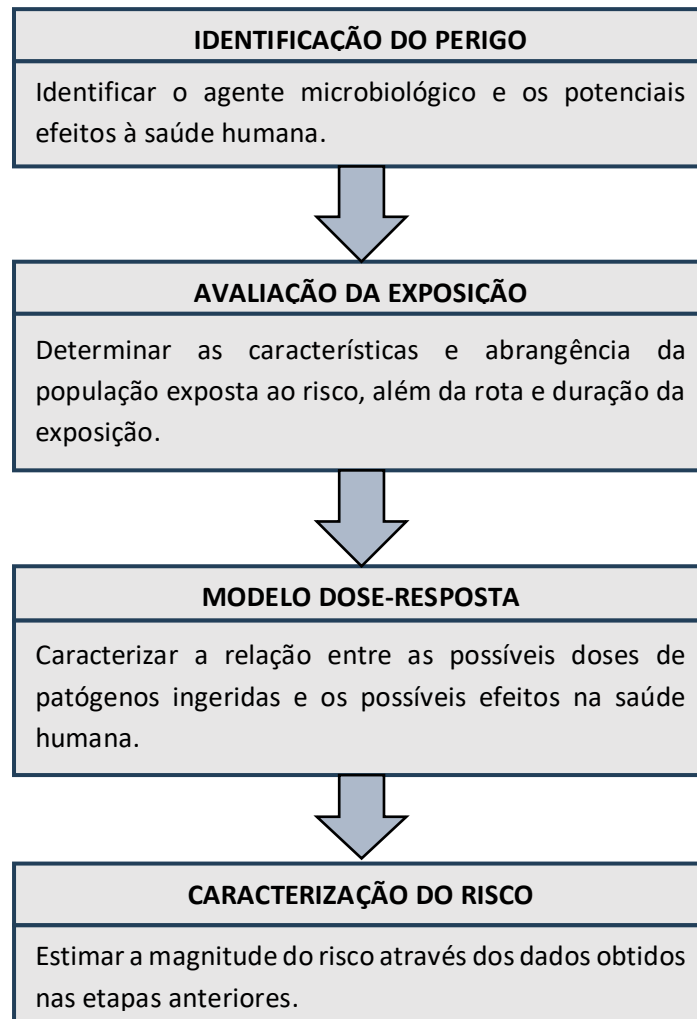
$P(n)$: risco de infecção de um indivíduo durante o período de 1 ano de exposição.

$P(i)$: risco de infecção de um indivíduo durante uma única exposição.

n : número de exposições em 1 ano.

A Figura 2 apresenta resumidamente o a metodologia da AQRM empregada neste trabalho:

Figura 2: Metodologia da AQRM



Fonte: Adaptado de HAAS, ROSE e GERBA (2014).

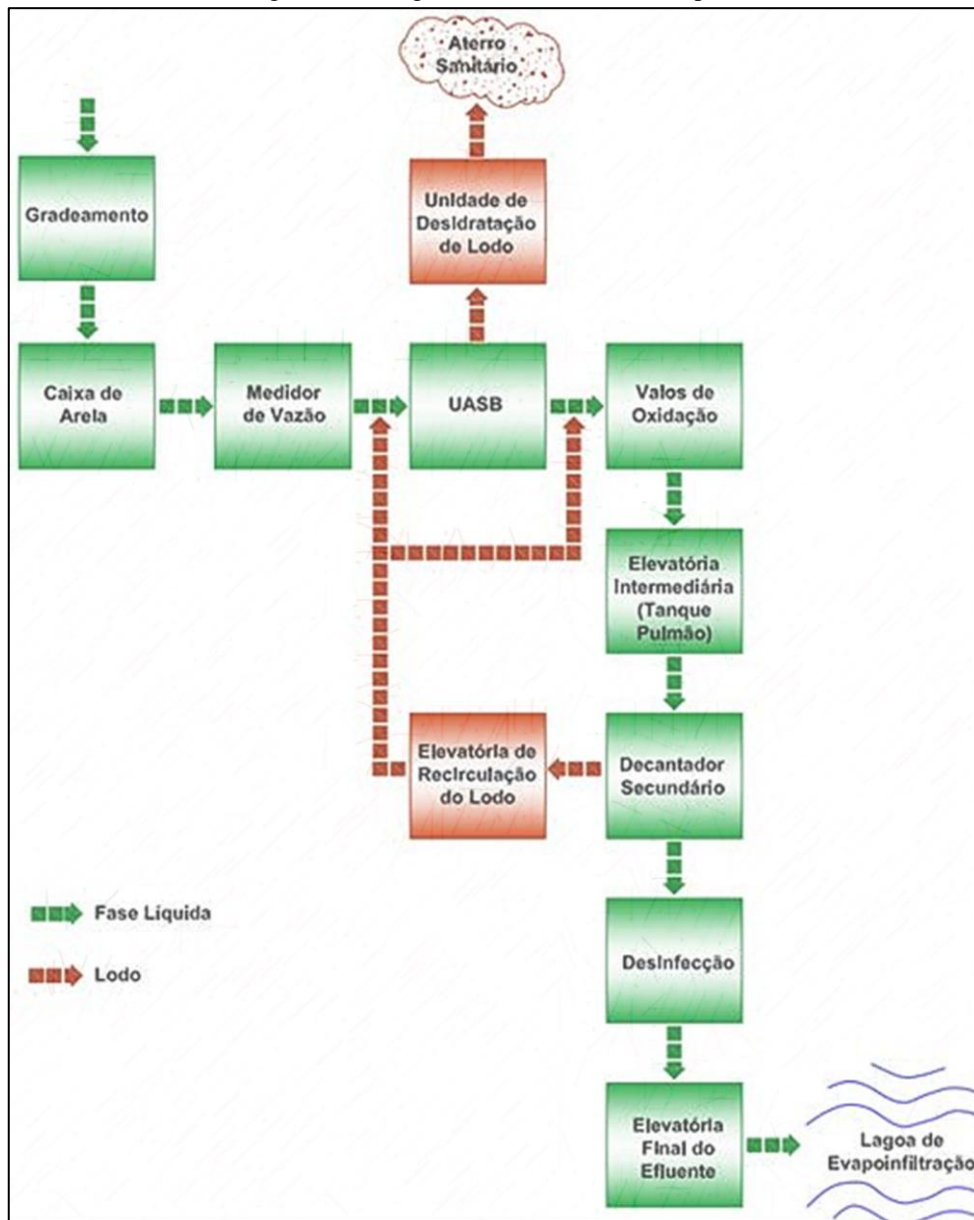
4 METODOLOGIA

4.1 DADOS ANALISADOS

Os dados dos efluentes da estação de tratamento foram fornecidos pela prestadora de serviços que administra a estação, estando localizada no município de Florianópolis. Os dados estavam em formato de planilhas com resultados de amostras de esgoto bruto e efluente tratado para diversos parâmetros, sendo a concentração de *Escherichia coli* (NMP/100mL) o parâmetro analisado no estudo. O Apêndice A contém as concentrações de *E. Coli* para efluente bruto e tratado da estação de Florianópolis do período fornecido, juntamente com a remoção em unidades logarítmicas na base 10 para cada amostra.

Os dados da ETE de Florianópolis em questão correspondem ao período entre fevereiro de 2013 e maio de 2023. A ETE recebe vazão afluyente média de 50 L/s e máxima de 73 L/s, possuindo sistema de tratamento secundário composto por reator UASB, reatores de lodos ativados e decantador secundário, contando por fim com processo de desinfecção por cloração. A Figura 3 mostra a sequência de tratamento aplicada na estação:

Figura 3: Fluxograma da ETE de Florianópolis



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Para a análise realizada neste trabalho, foram utilizados apenas valores de concentração de *E. coli* patogênica (8% da concentração total). Esses valores encontram-se no Apêndice B.

Conforme apresenta as diretrizes da OMS, a eficiência de remoção de bactérias para a modalidade de tratamento secundário com reator UASB é de 0,5 a 1,5 unidades de \log_{10} , de 1 a 2 unidades de \log_{10} para o tratamento com Lodos Ativados com sedimentação secundária, e de 2 a 6 unidades de \log_{10} para tratamento terciário com desinfecção por cloração (WHO, 2006a). Por fim, para um tratamento que apresenta todos esses tipos de tratamento, a remoção de bactérias de *E. coli* deve ficar na faixa de 3,5 a 9,5 unidades \log_{10} .

4.2 REMOÇÃO DE *E. COLI* PELA ETE AVALIADA

Além da AQRM este estudo apresenta uma análise das estatísticas descritivas, incluindo médias, medianas, valores mínimos e máximos, para a rota tecnológica da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) selecionada. Os dados também foram plotados em gráficos, como box plots e séries temporais, utilizando a linguagem Python, mais especificamente da biblioteca *plotly*, que permitiu criar visualizações para uma compreensão mais detalhada da série de dados.

A eficiência de remoção de *E. coli* da rota tecnológica de tratamento de esgotos é expressa em termos de unidades de log de remoção calculada conforme a Equação 4.

$$LR = \log_{10} \left(\frac{C_{\text{efluente bruto}}}{C_{\text{efluente tratado}}} \right) \quad (4)$$

Onde:

LR: Unidades \log_{10} de remoção da concentração de *E. coli*;

C efluente bruto: Concentração de *E. coli* no efluente bruto em NMP/100 mL;

C efluente tratado: Concentração de *E. coli* no efluente tratado em NMP/100 mL;

4.3 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO

4.3.1 Identificação do Perigo

Conforme mencionado, o efluente tratado da ETE foi analisado a fim de avaliar o risco de utilizá-lo como água de reúso em atividades urbanas selecionadas, considerando diferentes rotas de transmissão e o número de exposições no período de 1 ano. As atividades avaliadas incluíram: irrigação de jardim (inalação de aerossóis e ingestão por exposição rotineira), irrigação de áreas públicas (ingestão por exposição rotineira), descarga de vaso sanitário (inalação de aerossóis), lavagem de veículos e lavagem de pisos (ambos envolvendo inalação de aerossóis e ingestão por exposição rotineira).

Foi considerado como grupo suscetível à contaminação adultos de Florianópolis, que realizam com maior frequência as atividades analisadas e, conseqüentemente, apresentariam maior exposição à água de reúso.

Nesta etapa foi determinada a *E. coli* patogênica como microrganismo estudado, devido à sua alta prevalência em efluentes domésticos e por poder causar diversos sintomas

como gastroenterite, diarreia, dores abdominais, náuseas, vômitos e febre, além de complicações mais graves, como desidratação severa e síndrome hemolítico-urêmica.

4.3.2 Avaliação da Exposição

Esta é a etapa que determina a concentração do patógeno desde o ponto de origem até o ponto de exposição e o volume ingerido ou inalado em um evento de exposição. O objetivo da avaliação da exposição é a quantificação da dose de patógenos a qual, neste estudo, o indivíduo estará exposto. A dose (Equação 4) servirá como dado de entrada no modelo dose-resposta da etapa de avaliação dos efeitos na saúde. Vale ressaltar que para este trabalho foi considerado que 8% da concentração de *E. coli* no efluente é patogênica (WHO, 2016).

4.3.2.1 Determinação da Concentração de E. coli no Efluente Tratado

O primeiro passo para a avaliação da exposição é a determinar a origem da concentração inicial dos patógenos. O ponto de origem para este estudo é a saída do efluente tratado na ETE, a qual utiliza a rota tecnológica de tratamento UASB + Reator de Lodos Ativados + Decantador Secundário + Desinfecção.

A concentração de *E. coli* no efluente tratado é obtida conforme abordado no item 4.1. Com a série histórica do efluente tratado foi determinada a distribuição de probabilidade que melhor se ajustava aos dados conforme o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

As distribuições avaliadas foram aquelas mais usuais em amostras ambientais e, em específico, para caracterizar efluente tratado, sendo elas as distribuições: Normal, Lognormal, Gama, Exponencial e Weibull (STOCKER; PACHEPSKY; SHELTON, 2014; SYLVESTRE et al., 2020; ZHITENEVA et al., 2020; ZHU; CAMPANELLA; CHEN, 2021). A determinação da distribuição, bem como a realização dos testes estatísticos, foram feitas utilizando a linguagem de programação Python, mais especificamente a biblioteca `scipy.stats`.

4.3.2.2 Volume Ingerido por Atividade e Rota de Exposição

A exposição, segundo Ashbolt et al. (2005), está associada aos parâmetros: volume de ingestão, rota de exposição e frequência. Segundo o mesmo autor, para as atividades de irrigação de jardins (aerossol ou ingestão rotineira), irrigação de áreas públicas (ingestão rotineira) e descargas de vaso sanitário (aerossol), o volume ingerido é definido por meio da distribuição triangular pelos valores mínimo, médio e máximo para cada atividade; já a frequência de eventos é definida por uma distribuição normal, utilizando a média e o desvio padrão correspondentes.

A Tabela 1 expõe os valores das distribuições de volume ingerido e frequência de eventos adotados segundo cada atividade e rota de exposição:

Tabela 1: Distribuição da exposição relacionada à água de reúso

Atividade	Rota de exposição	Volume ingerido (mL/h) [mínimo, médio; máximo]	Frequência (ano) [média; desvio padrão]
Irrigação de jardim	Aerossol	(0,01; 0,1; 0,5)	(150; 20)
	Ingestão (exposição rotineira)	(0,1; 1; 2)	(150; 20)
Irrigação de áreas públicas	Ingestão (exposição rotineira)	(0,10; 1; 10)	(60; 10)
Vaso Sanitário	Aerossol	(0,01; 0,1; 0,5)	(1460; 100)
Lavagem de veículos	Aerossol	(0,01; 0,1; 0,5) *	(48; -) *
	Ingestão (exposição rotineira)	(0,1; 1; 2) *	(48; -) *
Lavagem de pisos	Aerossol	(0,01; 0,1; 0,5) ***	(11,06; -) **
	Ingestão (exposição rotineira)	(0,1; 1; 2) ***	(11,06; -) **

Fonte: ASHBOLT et al. (2005); *adaptado de TOMAZ (2003); **ZANETI et al. (2011); ***autor

Os valores de frequência de exposição anual do usuário à água de reúso empregada na lavagem de pisos e veículos basearam-se no consumo anual de água para essas finalidades, conforme é mencionado em Tomaz (2003). Já o volume ingerido durante a lavagem de pisos foi semelhante ao da lavagem de veículos mencionada por Zaneti et al. (2011), uma vez que os mecanismos de lavagem são os mesmos: mangueiras e lavadoras de alta pressão. O volume ingerido na lavagem de pisos foi considerado o mesmo da lavagem de veículos por ambas as atividades utilizarem o mesmo mecanismo de lavagem: mangueiras e lavadoras de alta pressão.

4.3.3 Modelo dose-resposta

O modelo dose-resposta foi definido a partir de literaturas que abordavam situações parecidas com a deste trabalho. Diversos estudos descrevem o modelo Beta-Poisson como o modelo mais representativo para *E. coli* (HAAS et al., 2000; TEUNIS et al., 2004). O modelo foi previamente descrito no item 3.3.3.1 e representado pela Equação 2. Segundo Teunis et al. (2008), os valores dos parâmetros característicos de interação agente-hospedeiro mais indicados

para o modelo são os evidenciados pelo trabalho de DuPont (1971), sendo eles $\alpha = 0,050$ e $\beta = 1,001$ para adultos. Estes foram os valores utilizados neste trabalho.

4.3.4 Caracterização do risco

Nesta etapa, o autor utilizou o Jupyter Notebook, uma ferramenta amplamente usada para programação em Python, junto com bibliotecas específicas fornecidas pelo pacote Anaconda. Foram escritas células de código para aplicar a técnica de Simulação de Monte Carlo, usada para resolver problemas matemáticos relacionados à AQRM. As finalidades do uso desse tipo de arquivo, linguagem e bibliotecas foram:

- Gerar valores aleatórios de concentração de *E. coli* patogênica no efluente tratado, de volume de água ingerido e de frequência de exposição em grande quantidade segundo distribuição Lognormal, Triangular e Normal, respectivamente;
- Calcular a dose ingerida (Equação 4), utilizando os valores de concentração de *E. coli* e volume de água ingerido gerados em 1000 simulações;
- Calcular a probabilidade de infecção por exposição pelo modelo de Beta-Poisson (Equação 2) por meio das doses do patógeno ingeridos por água de reúso e dos coeficientes α e β ;
- Calcular a probabilidade de infecção para o período de 1 ano de exposições (Equação 3), utilizando os valores de probabilidade de infecção por exposição e os valores de frequência de exposição em um ano, sendo estes últimos valores gerados em 1000 simulações.
- Incorporar os dados em gráficos que representassem as curvas de probabilidade de infecção para cada atividade / rota de exposição.

Os dados de concentração de *E. coli* foram tratados e padronizados inicialmente em uma planilha Excel. Em seguida, foi usada a biblioteca *numpy* para realizar cálculos matemáticos e a biblioteca *pandas* para carregar os dados da planilha e organizá-los em tabelas chamadas *DataFrames*, facilitando sua manipulação e análise. A biblioteca *scipy.stats* foi utilizada para aplicar o teste de Kolmogorov-Smirnov, que ajudou a identificar a função de densidade que melhor se ajustava aos dados de concentração de *E. coli*. Além disso, essa biblioteca foi usada para gerar valores aleatórios baseados nas distribuições Lognormal, Triangular e Normal. Por fim, os gráficos foram criados com a biblioteca *plotly*, permitindo

visualizações interativas dos resultados e geração de figuras com os plots das curvas de probabilidade de infecção.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONCENTRAÇÃO DE *E. COLI* NO EFLUENTE BRUTO E TRATADO E EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Na Tabela 2 são apresentados os valores mínimos, máximos, média e mediana das concentrações de *E. coli* no efluente bruto e tratado referentes à rota tecnológica da ETE em estudo.

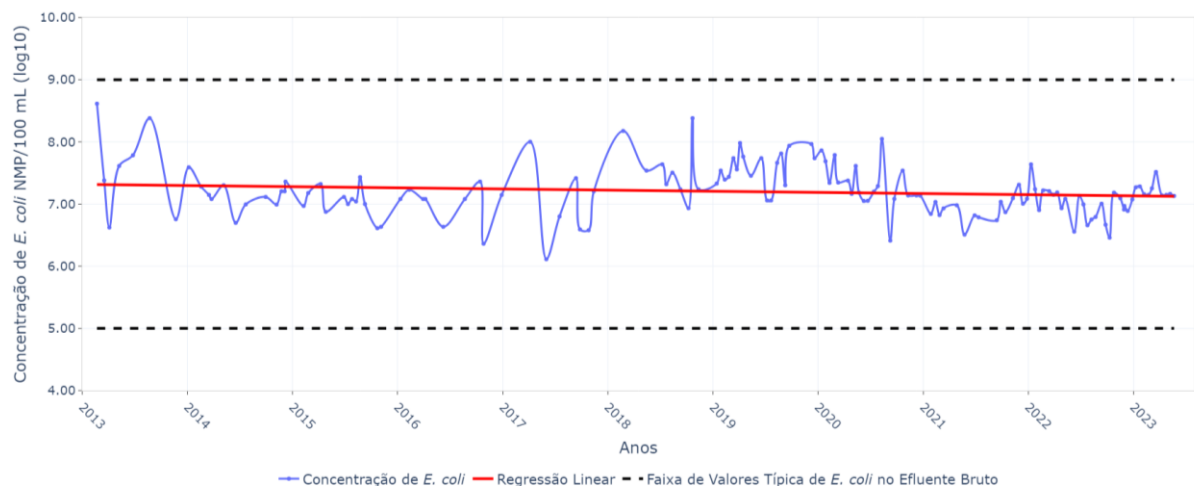
Tabela 2: Estatística descritiva da Concentração de *E. coli* no Efluente Bruto e Tratado

Efluente	Valor	Valor	Média	Mediana
	Mínimo	Máximo		
	<i>E. coli</i> NMP/100 mL	<i>E. coli</i> NMP/100 mL	<i>E. coli</i> NMP/100 mL	<i>E. coli</i> NMP/100 mL
Bruto	1,30E+06	4,10E+08	2,76E+07	1,40E+07
Tratado	1,00E+00	3,65E+06	9,39E+04	1,00E+03

Fonte: Elaboração Própria (2024)

Na Figura 4 é apresentada a concentração do efluente bruto da série completa de dados em escala logarítmica de base 10. É possível observar uma leve tendência de diminuição da concentração ao longo dos anos. Os dados de literatura apresentam valores de cerca de aproximadamente 10^5 a 10^9 para *E. coli* e Coliformes Termotolerantes (METCALF & EDDY et al., 2003; WHO, 2006), representados na Figura 4 pelas linhas pretas tracejadas.

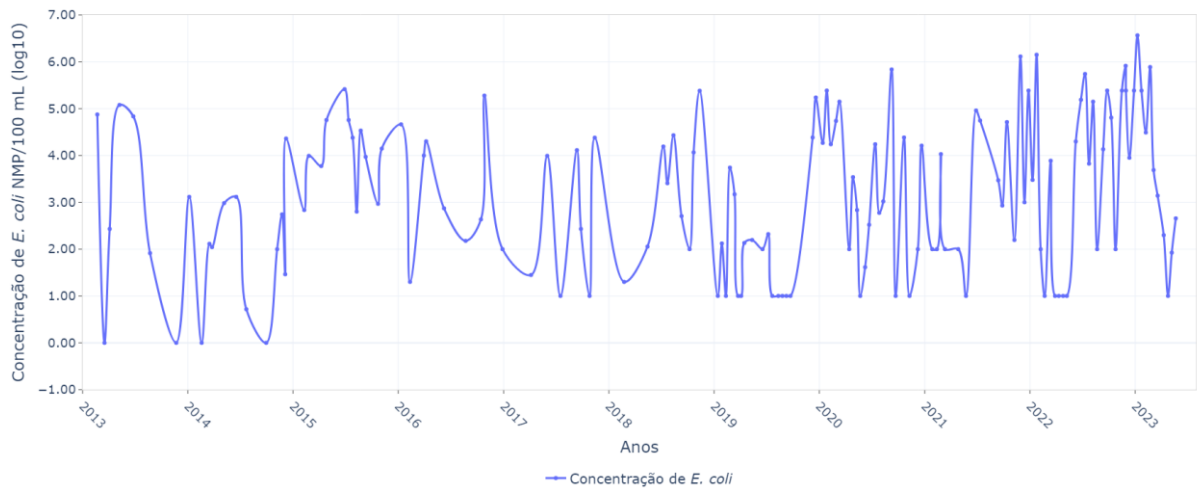
Figura 4: Série Histórica da Concentração de *E. coli* no Efluente Bruto e Valores de Referência de Literatura



Fonte: Elaboração Própria (2024)

A Figura 5 apresenta a série histórica da concentração de *E. coli* no efluente tratado. Para fins de visualização o gráfico é apresentado em escala logarítmica de base 10 novamente, utilizando linhas com curvas suavizadas e um intervalo de concentração entre 10^{-1} e 10^7 NMP/100 mL no eixo Y.

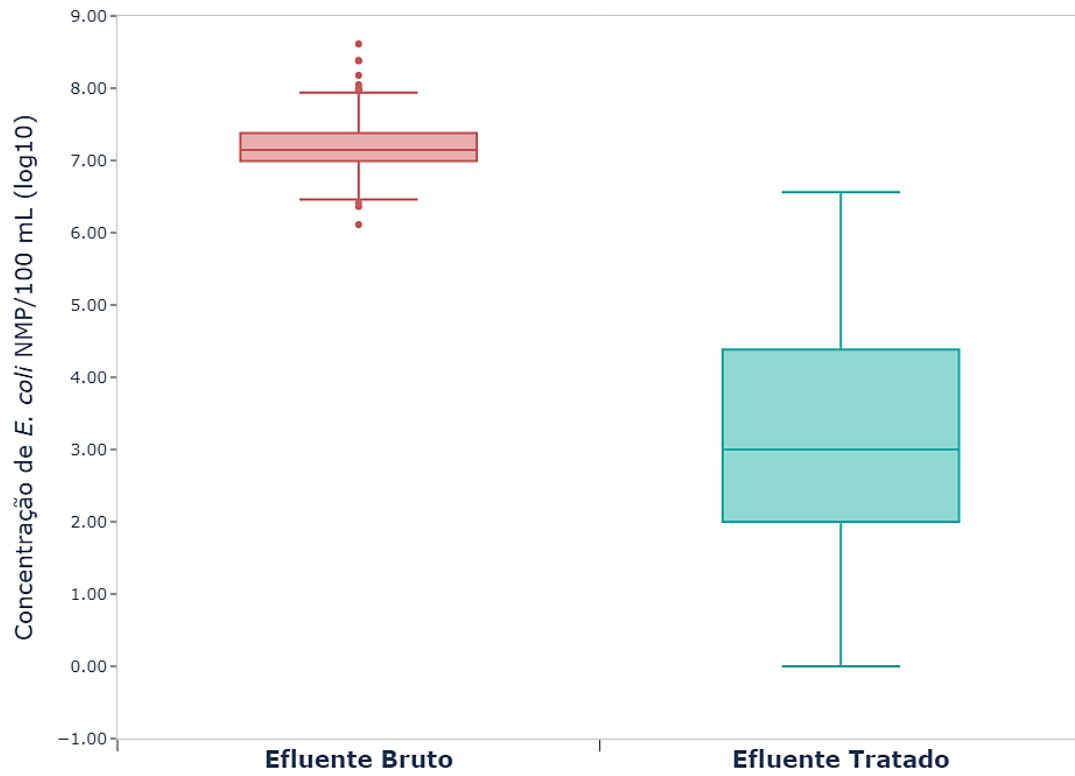
Figura 5: Série Histórica da Concentração de *E. coli* no Efluente Tratado



Fonte: Elaboração Própria (2024)

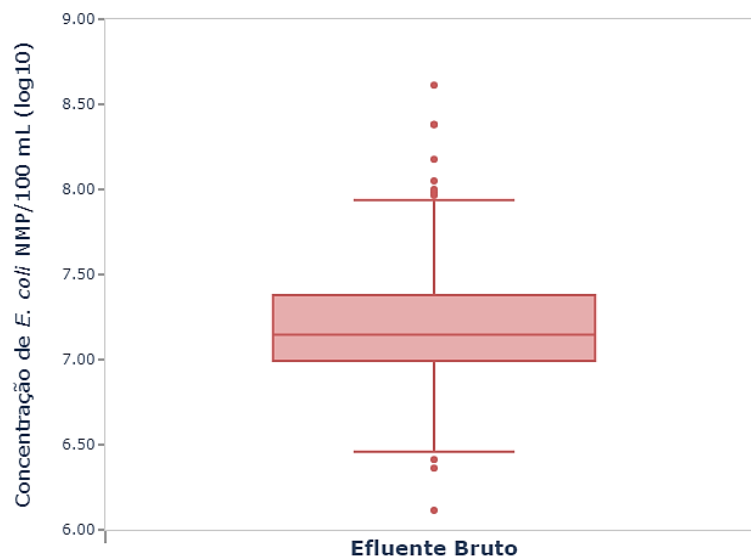
Na Figura 6 é apresentado um box plot com as concentrações do efluente bruto e tratado para a rota tecnológica da ETE estudada. Como a variação da concentração de *E. coli* no efluente tratado é razoavelmente maior que a do efluente bruto, foi feito um box plot na Figura 7 para melhor visualização do gráfico para essa fonte.

Figura 6: Box Plot com Concentrações de *E. coli* no Efluente Bruto e Tratado



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 7: Box Plot com Concentrações de *E. coli* no Efluente Bruto



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Também foram calculadas as eficiências de remoção de *E. coli* para a ETE estudada, sendo estas representadas na Tabela 3 por unidades \log_{10} de remoção relativas às concentrações média e mediana do efluente bruto e tratado.

Tabela 3: Unidades \log_{10} de Remoção de *E. coli* do Efluente Tratado

Rota tecnológica	LR Média	LR Mediana
UASB + Reator de Lodos Ativados + Decantador Secundário + Desinfecção	2,47	4,15

Fonte: Elaboração Própria (2024)

Não havia informações detalhadas sobre a etapa de desinfecção do efluente para esta ETE, contudo, a prática mais usual no Brasil é a dosagem de cloro (JORDÃO; PESSOA, 2005). O processo de desinfecção, ao contrário do tratamento secundário, possui como objetivo específico a remoção de patógenos, e por este motivo espera-se um valor de remoção mais elevado (WHO, 2006b).

A eficácia da desinfecção por cloração em efluentes depende de uma complexa interação entre características do efluente e parâmetros operacionais. A presença de sólidos em suspensão, matéria orgânica e compostos redutores pode afetar negativamente a ação do cloro. Além disso, o controle da dosagem de cloro, do tempo de contato e da hidráulica do reator são fatores operacionais cruciais para garantir a eficácia do processo (GONÇALVES et al., 2003). Apesar de o processo de execução da cloração em si ser considerado simples, todos os fatores mencionados contribuem para que a remoção de *E. coli* e outras bactérias possa ser um desafio.

O valor de médio de 2,47 unidades \log de remoção de *E. coli* ficou abaixo do intervalo esperado segundo a literatura, o qual está entre 3,5 e 9,5 unidades \log_{10} de remoção de bactérias para modelos de tratamento com reator UASB, Lodos Ativados com decantador secundário e desinfecção por cloração. Porém, como o conjunto dos valores de remoção apresentam assimetria negativa (devido a assimetria positiva dos valores de efluente tratado), a mediana pode representar melhor o comportamento da distribuição desses valores. Dessa forma, a mediana apresentou o valor de 4,15 unidades \log_{10} de remoção de bactérias *E. coli*, indicando que a maior parte das unidades logarítmicas de remoção encontra-se dentro do intervalo esperado para o tratamento com as 3 unidades de tratamento específicas.

5.2 AVALIAÇÃO DE RISCO MICROBIOLÓGICO

Os resultados da Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico serão apresentados por atividade e rota de exposição.

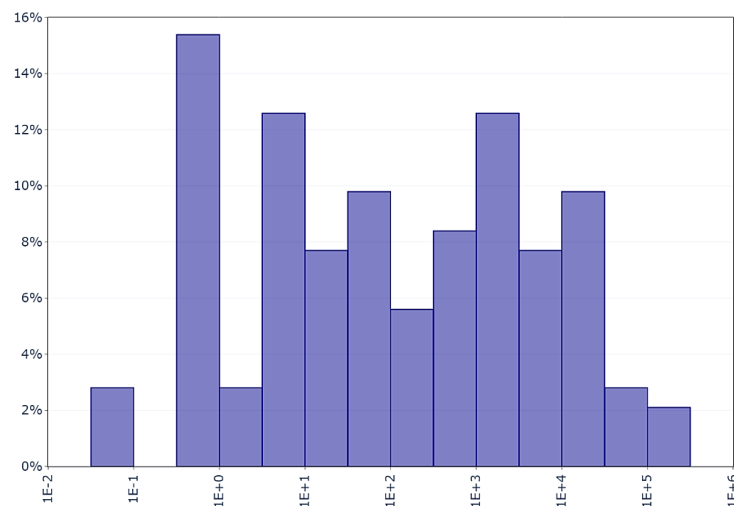
5.2.1 Determinação da Distribuição de Frequência de *E. coli* no Efluente Tratado

A primeira etapa quantitativa da AQRM consiste em determinar a concentração do patógeno no ponto de origem estabelecido pelo estudo. Como dado de entrada na AQRM, foi definida a distribuição de frequência dos dados de concentrações de *E. coli* para a rota tecnológica da ETE analisada.

Para os dados de concentração de *E. coli* do efluente tratado da ETE foi definida a distribuição Lognormal, que tem ampla utilização para descrição da concentração de microrganismos no efluente tratado e teve a maior aderência para o teste de Kolmogorov-Smirnov (p -valor = 0,1521).

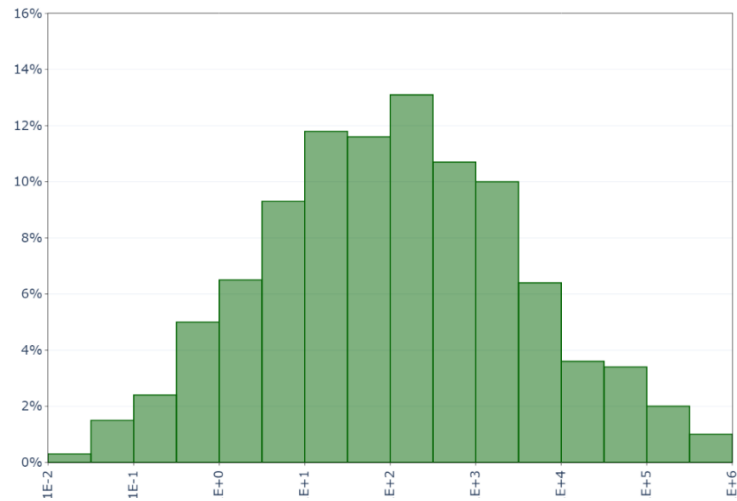
Para efeito de comparação, a Figura 8 apresenta a distribuição de frequência dos dados originais de concentração de *E. coli* patogênica no efluente tratado e a Figura 9 mostra a distribuição de frequência Lognormal, a qual demonstra a melhor representação dos dados de concentração de *E. coli* patogênica para esta ETE. Ambas as figuras apresentam a concentração em escala logarítmica de base 10:

Figura 8: Distribuição de Frequência - Concentração de *E. coli* no Efluente Tratado (Dados Originais)



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Figura 9: Distribuição de Frequência - Concentração de *E. coli* no Efluente Tratado (Distribuição Lognormal)



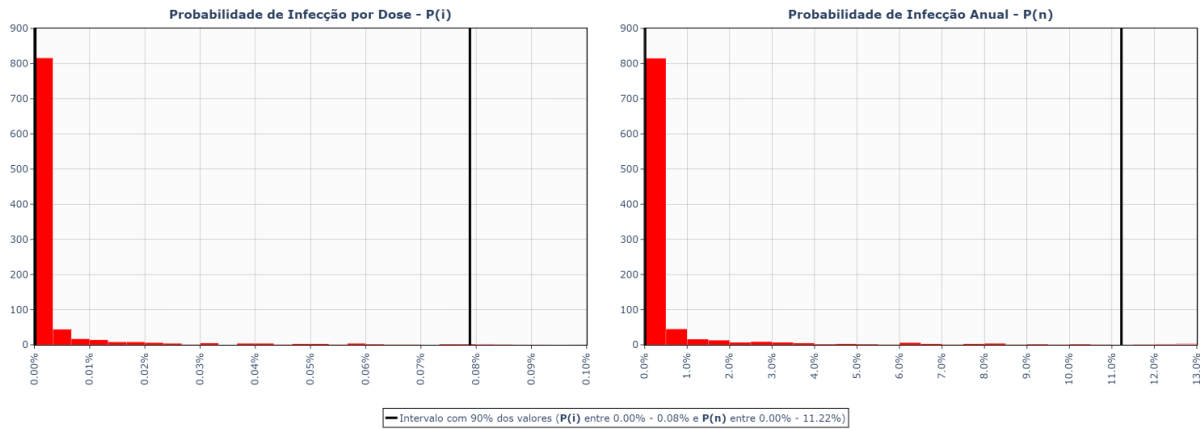
Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.2.2 Cenário 1 - Irrigação de Jardim (Aerossol)

O Cenário 1 avalia a exposição de um indivíduo que execute a atividade irrigação de jardim com reúso do efluente tratado, considerando o risco de inalação via aerossol. A Figura 10 apresenta dois gráficos. O primeiro mostra a distribuição de probabilidade de infecção para ingestão de 1 dose ao longo de 1 hora, onde os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,01, 0,1 e 0,5 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 10 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 150 exposições de 1 hora, sendo o desvio padrão igual a 20. Em ambos os gráficos, é destacado o intervalo onde se encontram 90% dos valores de probabilidade.

Figura 10: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade irrigação de jardim, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições.



Fonte: Elaboração Própria (2024)

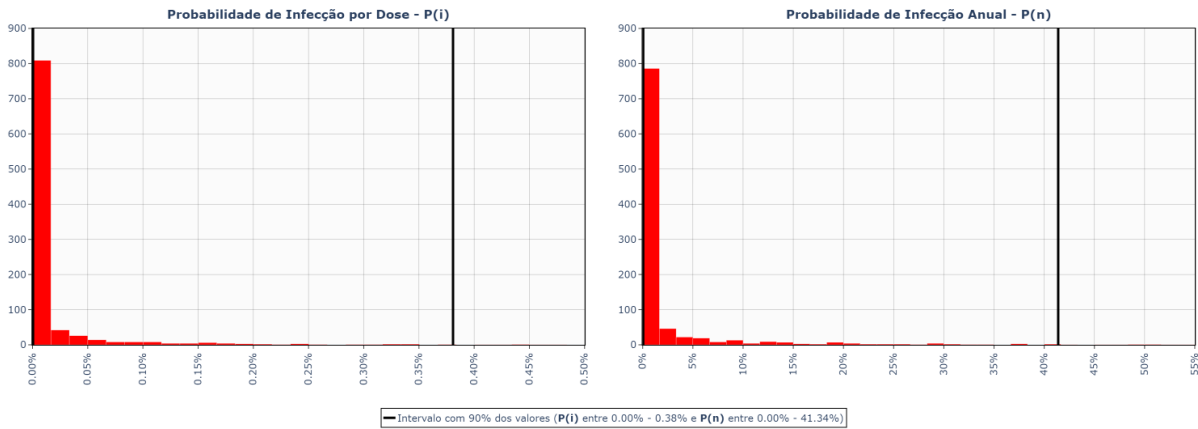
5.2.3 Cenário 2 - Irrigação de Jardim (Exposição Rotineira)

O Cenário 2 avalia a exposição de um indivíduo que execute a atividade de irrigação de jardim com reúso do efluente tratado, sendo este efluente ingerido em pequenos volumes por exposição rotineira. Este caso é diferente da exposição acidental, onde é ingerido um grande volume de água em uma única dose.

A Figura 11 apresenta uma curva de distribuição de probabilidade de infecção para uma única exposição de uma hora e outra para exposições de 1 dose no período de 1 ano. Para o primeiro gráfico, os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,1, 1 e 2 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 11 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 150 exposições de 1 hora, sendo o desvio padrão igual a 20.

Figura 11: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade irrigação de jardim, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.



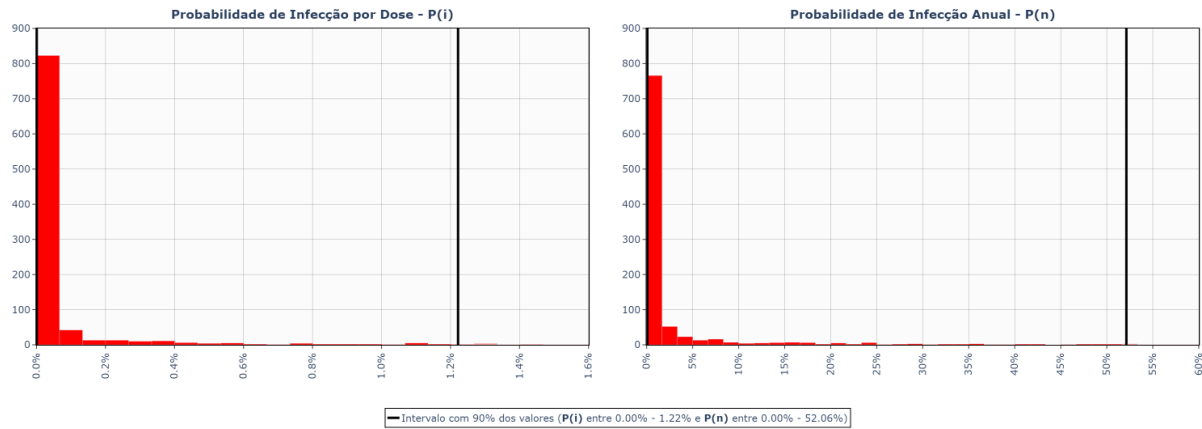
Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.2.4 Cenário 3 - Irrigação de Áreas Públicas (Exposição Rotineira)

O Cenário 3 avalia a exposição de um indivíduo que execute a atividade de irrigação de áreas públicas com reúso do efluente tratado, sendo este ingerido por exposição rotineira em pequenos volumes. A Figura 12 apresenta dois gráficos. O primeiro mostra a distribuição de probabilidade de infecção para ingestão de 1 dose ao longo de 1 hora, onde os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,1, 1 e 10 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 12 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 60 exposições de 1 hora, sendo o desvio padrão igual a 10.

Figura 12: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade irrigação de áreas públicas, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.



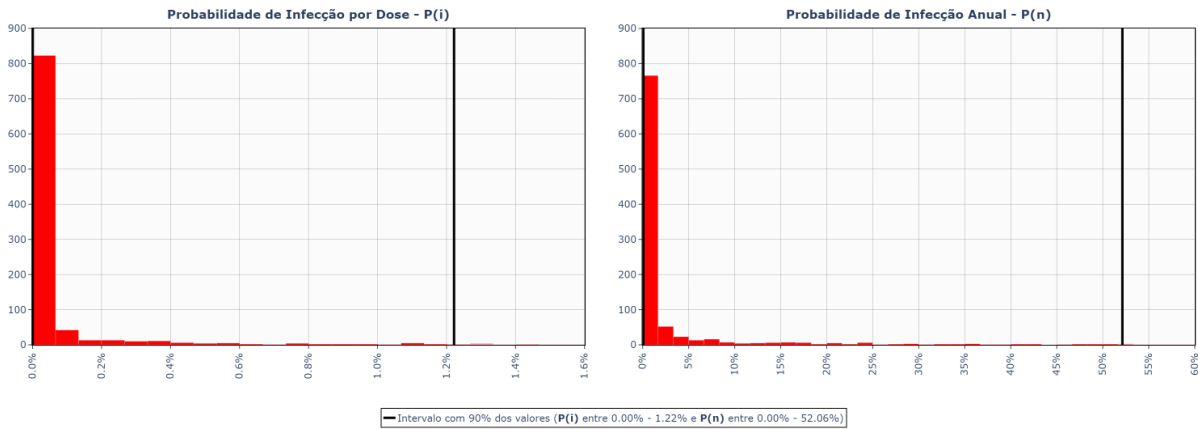
Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.2.5 Cenário 4 - Vaso Sanitário (Aerossol)

O Cenário 4 avalia a exposição de um indivíduo que execute a descarga de vaso sanitário com reúso do efluente tratado, sendo este ingerido via inalação por aerossóis. A Figura 13 apresenta dois gráficos. O primeiro mostra a distribuição de probabilidade de infecção para ingestão de 1 dose, onde os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,01, 0,1 e 0,5 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 13 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 1460 exposições, sendo o desvio padrão igual a 100.

Figura 13: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade descarga de vaso sanitário, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições.



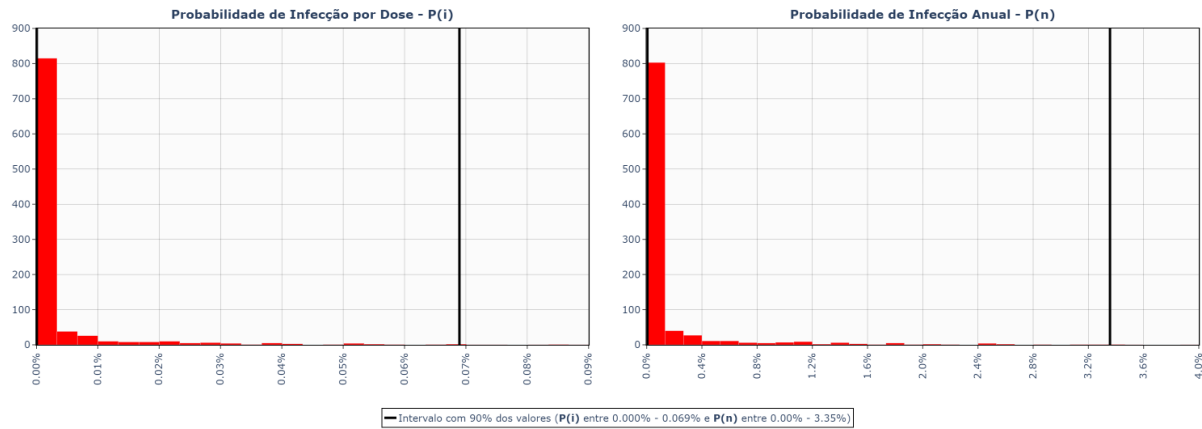
Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.2.6 Cenário 5 - Lavagem de Veículos (Aerossol)

O Cenário 5 avalia a exposição de um indivíduo que execute a lavagem de veículos com reúso do efluente tratado, sendo este ingerido via inalação por aerossol. A Figura 14 apresenta dois gráficos. O primeiro mostra a distribuição de probabilidade de infecção para ingestão de 1 dose ao longo de 1 hora, onde os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,01, 0,1 e 0,5 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 14 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 48 exposições.

Figura 14: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade lavagem de veículos, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições.



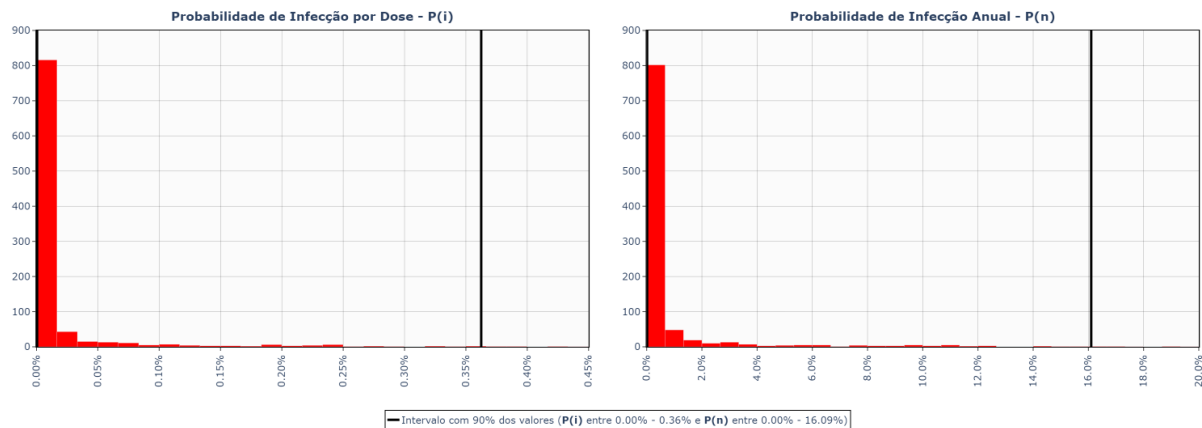
Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.2.7 Cenário 6 - Lavagem de Veículos (Exposição Rotineira)

O Cenário 6 avalia a exposição de um indivíduo que execute a lavagem de veículos com reúso do efluente tratado, sendo este ingerido via inalação por aerossol. A Figura 15 apresenta dois gráficos. O primeiro mostra a distribuição de probabilidade de infecção para ingestão de 1 dose ao longo de 1 hora, onde os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,1, 1 e 2 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 15 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 48 exposições.

Figura 15: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade lavagem de veículos, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.



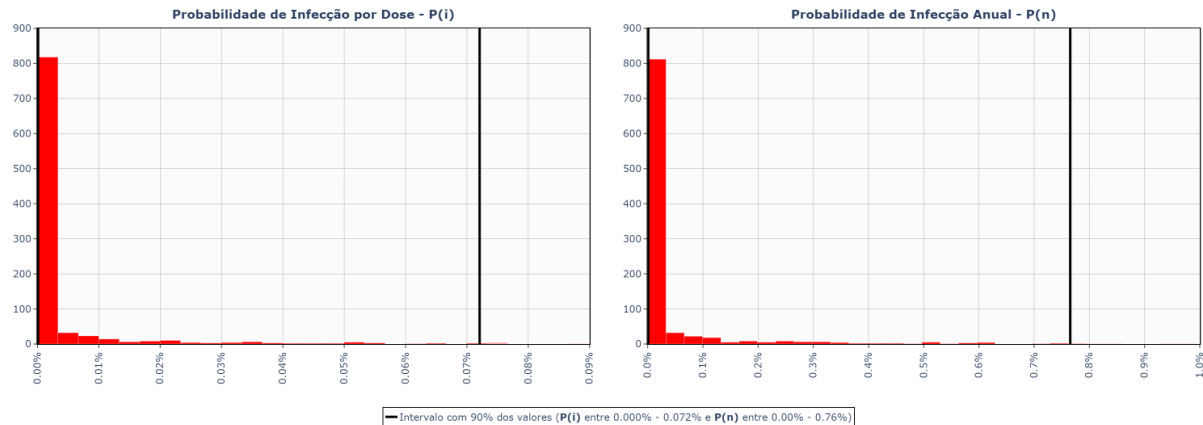
Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.2.8 Cenário 7 - Lavagem de Pisos (Aerossol)

O Cenário 7 avalia a exposição de um indivíduo que execute a atividade de lavagem de pisos com reúso do efluente tratado, sendo este ingerido via inalação por aerossol. A Figura 16 apresenta dois gráficos. O primeiro mostra a distribuição de probabilidade de infecção para ingestão de 1 dose ao longo de 1 hora, onde os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,01, 0,1 e 0,5 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 15 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 11,06 exposições.

Figura 16: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade lavagem de pisos, com exposição por inalação de aerossóis. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposições.



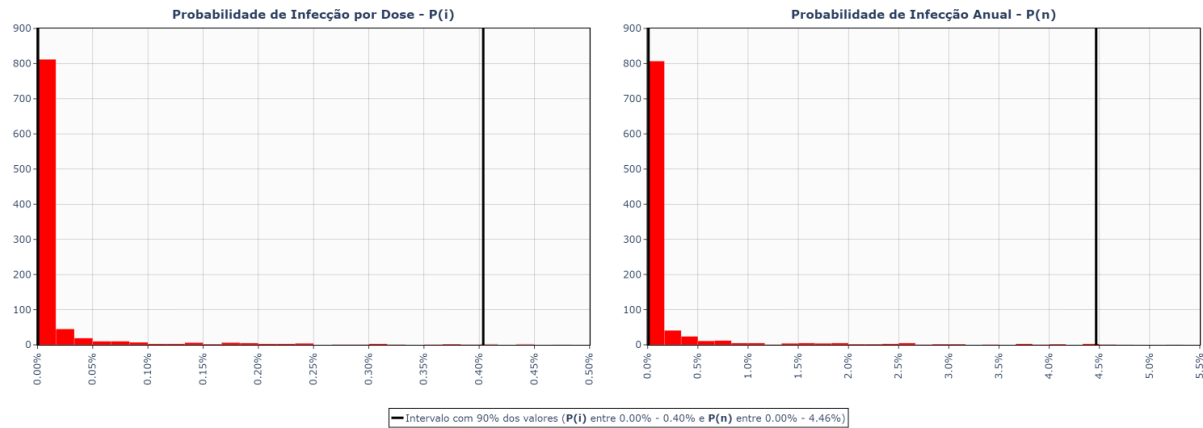
Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.2.9 Cenário 8 - Lavagem de Pisos (Exposição Rotineira)

O Cenário 8 avalia a exposição de um indivíduo que execute a atividade de lavagem de pisos com reúso do efluente tratado, sendo este ingerido via exposição rotineira em pequenos volumes. A Figura 17 apresenta dois gráficos. O primeiro mostra a distribuição de probabilidade de infecção para ingestão de 1 dose ao longo de 1 hora, onde os valores de volume ingerido se adequavam a distribuição triangular onde o valor mínimo, médio e máximo eram 0,1, 1 e 2 mL/h, respectivamente.

O segundo gráfico da Figura 15 ilustra a distribuição de probabilidade de infecção para 1 ano de exposições para esta atividade, onde os valores de número de exposições se adequavam a distribuição normal de frequência com média de 11,06 exposições.

Figura 17: Curvas de probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica para a atividade lavagem de pisos, com ingestão por exposição rotineira a pequenas doses. Período: 2013 a 2023. Adultos, considerando uma única exposição; adultos, considerando período de 1 ano de exposição.



Fonte: Elaboração Própria (2024)

5.3 RESUMO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO.

A Tabela 4 apresenta o resumo dos resultados ilustrados entre as Figuras Figura 10 e Figura 17 para todos os cenários avaliados, considerando apenas as curvas de probabilidade de infecção anual:

Tabela 4: Resumo dos resultados obtidos para distribuição de probabilidade de infecção anual P(n) relacionados a cada cenário de exposição.

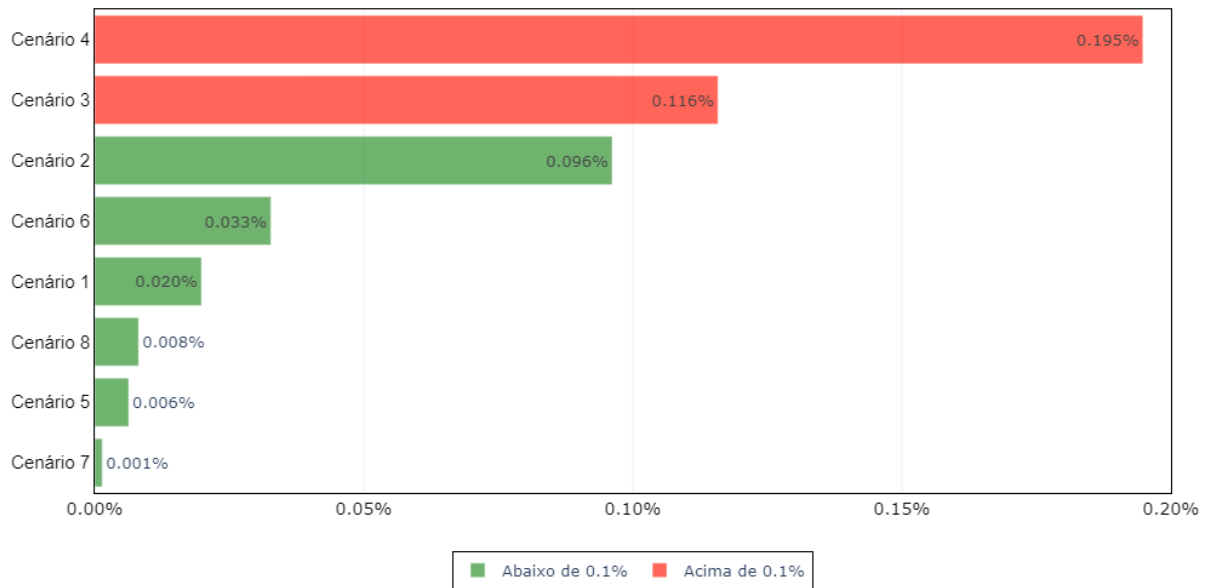
Cenário	Atividade	Rota de transmissão	Percentil 5%	Mediana	Média	Percentil 95%
1	Irrigação de Jardim	Aerossol	0,000047%	0,020%	2,62%	11,22%
2	Irrigação de Jardim	Exposição Rotineira	0,000315%	0,096%	5,76%	41,34%
3	Irrigação Áreas Públicas	Exposição Rotineira	0,000391%	0,116%	6,71%	52,06%
4	Vaso Sanitário	Aerossol	0,000466%	0,195%	7,67%	62,86%
5	Lavagem de Veículos	Aerossol	0,000015%	0,006%	1,37%	3,35%
6	Lavagem de Veículos	Exposição Rotineira	0,000100%	0,033%	3,29%	16,09%
7	Lavagem de Pisos	Aerossol	0,000005%	0,001%	0,47%	0,76%
8	Lavagem de Pisos	Exposição Rotineira	0,000027%	0,008%	1,40%	4,46%

Fonte: Elaboração Própria (2024)

Pode-se verificar que para todos os cenários o conjunto de valores apresenta mediana com valor muito menor que a média. Para o Cenário 7, por exemplo, o valor médio chega a ser 340 vezes maior que a mediana, indicando uma assimetria positiva considerável. Além disso, com os gráficos das Figuras Figura 10 a Figura 17 pode-se notar visualmente uma concentração dos resultados ao lado esquerdo e uma cauda longa ao lado direito, indicando a presença de poucos valores extremos que levam à essa diferença. Sendo assim, optou-se por utilizar a mediana para análise e comparação dos cenários.

A Figura 18 apresenta os resultados em formato de gráfico de barras horizontal. Dessa forma é possível avaliar e comparar visualmente o risco de infecção anual entre os cenários:

Figura 18: Valores medianos das curvas de probabilidade de infecção anual por cenário de exposição



Fonte: Elaboração Própria (2024)

Pode-se constatar que o Cenário 4 (Figura 13) é o que apresenta maior probabilidade de infecção por *E. coli* patogênica, onde o valor de 0,195% ultrapassa em quase 100% o limite estabelecido pela OMS de 0,1%, ou 10^{-3} pppa. Este é um cenário de uma única atividade e rota de transmissão, sendo estas a descarga de vaso sanitário e a inalação por aerossol, respectivamente.

Outra atividade que ultrapassa o limite é o Cenário 3 (Figura 12), sendo também um cenário de uma única atividade e rota de transmissão (irrigação de áreas públicas com ingestão por exposição rotineira). A mediana dos resultados possui valor de 0,116%, ultrapassando o valor de 0,1% por uma margem bem menor, a qual pode ser considerada pouco relevante.

A atividade de irrigação de jardim, caracterizada nos cenários 1 (Figura 10) e 2 (Figura 11), apresentou para ambas as rotas de transmissão valores inferiores a 0,1%, sendo estas rotas a inalação por aerossol (0,02%) e a ingestão por exposição rotineira (0,096%). A lavagem de veículos, representados nos cenários 5 (Figura 15) e 6 (Figura 16), e a lavagem de pisos, representados pelos cenários 7 (Figura 17) e 8 (Figura 18) também apresentaram valores abaixo do limite. Nos cenários de lavagem onde a rota de exposição foi inalação por aerossol, os valores foram de 0,006% para lavagem de carros e 0,001% para lavagem de pisos. Já para a rota de ingestão por exposição rotineira de pequenas doses, os valores foram de 0,033% para lavagem de carros e 0,008% para lavagem de pisos.

Sobre as atividades de lavagem, observando a Tabela 1 é possível perceber que, para cada rota de exposição, os valores de distribuição triangular dos volumes ingeridos em uma

única exposição são idênticos. Isso se deve ao fato já mencionado de ambas utilizarem o mesmo mecanismo de lavagem: mangueiras e lavadoras de alta pressão. Dessa forma, é possível reparar que o volume de água ingerido e a frequência de exposições são os fatores que diferenciam os resultados em cada atividade, já que a origem é a mesma água de saída da ETE analisada (mesma distribuição de frequência de concentração) e o microrganismo analisado foi a *E. coli* patogênica para todas as atividades (mesmo α e β).

Pode-se notar também que, para as atividades com 2 rotas de exposição (cenários 1, 2, 5, 6, 7 e 8), sendo estas inalação por aerossol e ingestão por exposição rotineira, a segunda sempre apresentou maior risco anual de infecção. Pode-se inferir a partir disso que, mesmo os valores da distribuição do volume ingerido sendo menores na ingestão por exposição rotineira, os valores da distribuição da frequência com que o indivíduo tem contato por meio dessa exposição são bem mais elevados, o que faz com que os riscos calculados sejam maiores. Mesmo assim, para todas essas atividades os riscos foram abaixo do limite superior estabelecido pela OMS, sendo então consideradas atividades com risco de infecção tolerável para uso de efluente tratado da ETE analisada.

As únicas atividades que apresentaram risco acima do estabelecido foram descarga de vaso sanitário (aerossol) e irrigação de áreas públicas (exposição rotineira). Com relação aos valores de distribuição do volume ingerido, a atividade irrigação de áreas públicas apresentou números bem mais elevados que a descarga de vaso sanitário. Todavia, a frequência com que um indivíduo adulto se expõe a este último cenário é significativamente maior, sendo este o fator principal para que a descarga de vaso sanitário, mesmo com exposição em pequenos volumes do efluente tratado, possa apresentar o maior risco de infecção anual. Esta atividade necessitaria de maiores medidas de mitigação de risco para que o reúso do efluente tratado possa ser aplicável.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho o risco microbiológico associado ao reúso do efluente tratado de uma Estação de Tratamento de Esgoto de Florianópolis foi calculado para 8 cenários de exposição (atividade + rota de exposição). A metodologia AQRM foi aplicada e o uso de linguagem de programação Python foi utilizada para realização dos cálculos de modelagem para a Simulação de Monte Carlo e elaboração das visualizações em gráficos para cada cenário.

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, a análise da Estação de Tratamento de Esgoto revelou uma eficiência satisfatória na remoção de *E. coli* na maioria dos resultados de análise, com a mediana das unidades logarítmicas de remoção (4,15) dentro do intervalo esperado para o sistema de tratamento utilizado (entre 3,5 e 9,5 para UASB + lodos ativados com decantador secundário + desinfecção por cloração). Contudo, a média (2,47) ficou abaixo desse intervalo, sugerindo a presença de valores discrepantes. Recomenda-se para trabalhos posteriores uma investigação com relação a outros fatores que influenciam os resultados de remoção, como: valores de DBO, DQO e sólidos suspensos no efluente tratado; dosagem de cloro utilizada; tempo de contato e hidráulica do reator.

A análise quantitativa de risco microbiológico (AQRM) evidenciou que o reúso do efluente tratado em diversas atividades urbanas apresenta riscos aceitáveis segundo os parâmetros da OMS (risco de infecção anual inferior a 0,1%). Atividades como irrigação de jardins, lavagem de veículos e pisos mostraram riscos toleráveis. Entretanto, a descarga de vasos sanitários com água de reúso apresentou um risco anual de infecção (0,195%) acima do limite aceitável, enquanto a irrigação de áreas públicas ultrapassou o limite por uma margem menor (0,116%). Fatores como a concentração de *E. coli* patogênica no efluente tratado, o volume de água ingerido ou inalado e a frequência de exposição foram determinantes para a determinação dos níveis de risco. A alta frequência de exposição no uso de descargas sanitárias contribuiu significativamente para o risco elevado, mesmo com baixos volumes de ingestão.

A princípio este cenário de exposição indica que deve haver medidas para mitigar o risco de infecção por *E. coli* patogênica no caso de aplicação do efluente tratado, porém alguns outros fatores poderiam ser levados em consideração na análise de risco para trabalhos posteriores. Um deles seria o decaimento da concentração do patógeno analisado até os pontos de utilização do efluente, já que os valores são baseados apenas nas análises realizadas ao fim do tratamento. Além disso, a sazonalidade dos resultados poderia ser levada em consideração, considerando que fatores como temperatura e precipitação podem ter grande influência nos resultados. A carga hidráulica também deve ter grande influência em cidades como

Florianópolis, onde o turismo no verão faz com que a população praticamente dobre, sendo esse um desafio recorrente das ETEs da cidade.

Por fim, deve-se sempre levar em conta que a análise foi realizada para um único organismo patogênico. A inclusão de uma diversidade de microrganismos na análise, além da *E. coli*, ampliaria a compreensão dos riscos de forma global. Patógenos como vírus (norovírus, rotavírus, adenovírus, enterovírus e coronavírus), bactérias (*Salmonella spp.*, *Vibrio cholerae*, *Clostridium difficile*), protozoários (*Giardia intestinalis*, *Entamoeba histolytica*) e helmintos (*Ascaris lumbricoides* e *Schistosoma mansoni*) devem ser considerados em uma eventual tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 13969/1997 - Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação.** , 1997.
- ANA. **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil.** Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024a.
- ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2023.** Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024b.
- ASHBOLT, N. et al. **Microbial Risk Assessment (MRA) Tool.** Chalmers University of Technology, Gothenburg. Urban Water report 2005:7. [s.l: s.n.].
- BASTOS, R. K. X. et al. **Subsídios à regulamentação do reúso da água no Brasil - Utilização de esgotos sanitários tratados para fins agrícolas, urbanos e pisciculturais.** Revista DAE, v. 56, n. 177, p. 50–62, 2008.
- BLUMENTHAL, D. U. J. et al. **Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture: recommended revisions based on new research evidence.** 2000.
- BRASIL. **Vigilância E Controle Da Qualidade De Água.** Brasília - DF: Ministério da Saúde, 2006.
- CARR, R. M.; BLUMENTHAL, U. J.; MARA, D. D. **Health guidelines for the use of wastewater in agriculture: developing realistic guidelines.** Em: SCOTT, C. A.; FARUQUI, N. I.; RASCHID-SALLY, L. (Eds.). *Wastewater use in irrigated agriculture: confronting the livelihood and environmental realities.* 1. ed. UK: CABI Publishing, 2004. p. 41–58.
- COHIM, E.; KIPERSTOK, A. **Uso de água cinza para fins não potáveis: um critério racional para definição da qualidade.** . Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2007.
- CUNHA, V. D. D. **Estudo para proposta de critérios de qualidade da água para reúso urbano.** Mestrado em Engenharia Hidráulica—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1 out. 2008.
- DUPONT, H. L. et al. **Pathogenesis of *Escherichia coli* Diarrhea.** New England Journal of Medicine, v. 285, n. 1, p. 1–9, jul. 1971.
- GONÇALVES, R. F. et al. **Desinfecção de efluentes sanitários.** Vitória: s.n., 2003.
- GRIFFIN, J. S.; PLUMMER, J. D.; LONG, S. C. **Torque teno virus: an improved indicator for viral pathogens in drinking waters.** Virology Journal, v. 5, n. 1, p. 112, 2008.
- HAAS, C. N. et al. **Development of a dose-response relationship for *Escherichia coli* O157:H7.** International Journal of Food Microbiology, v. 56, n. 2–3, p. 153–159, 1 jun. 2000.
- HAAS, C. N.; ROSE, J. B.; GERBA, C. P. **Quantitative microbial risk assessment.** Second edition ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014.

HSU, B.-M. et al. **Evaluation of enterovirus recovery in surface water by different adsorption and elution procedures.** Chemosphere, v. 66, n. 5, p. 964–969, jan. 2007.

IPCC. **Climate change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2013.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgoto Doméstico.** 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

MANCUSO, P. C. S. et al. (EDS.). **Reúso de água.** 1a. ed ed. Barueri, SP: Manole, 2003.

MAY, S. **Caracterização, tratamento e reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 15 maio 2009.

METCALF & EDDY et al. (EDS.). **Wastewater engineering: treatment and reuse.** 4th ed ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

ROCHA, R. S. et al. **Avaliação da esquistossomose e de outras parasitoses intestinais, em escolares do município de Bambuí, Minas Gerais, Brasil.** Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, v. 33, n. 5, p. 431–436, out. 2000.

SANTOS, R. V. et al. **Identification of Entamoeba histolytica and E. dispar infection in Maceió, Alagoas State, northeast Brazil.** The Journal of Infection in Developing Countries, v. 10, n. 10, p. 1146–1150, 31 out. 2016.

SCHLINDWEIN, A. D. et al. **Detection of enteric viruses in sewage sludge and treated wastewater effluent.** Water Science and Technology, v. 61, n. 2, p. 537–544, 1 jan. 2010.

SCOTT, C. A.; FARUQUI, N. I.; RASCHID-SALLY, L. **Wastewater use in irrigated agriculture: management challenges in developing countries. Wastewater use in irrigated agriculture: confronting the livelihood and environmental realities,** CABI Books. p. 1–10, jan. 2004.

SILVA, M. T. N. et al. **PREVALENCE OF Entamoeba histolytica/Entamoeba dispar IN THE CITY OF CAMPINA GRANDE, IN NORTHEASTERN BRAZIL.** Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo, v. 56, n. 5, p. 451–454, set. 2014.

SOARES, J. B. **Água: Microbiologia E Tratamento.** [s.l.] UFC Edições, 1999.

STOCKER, M. D.; PACHEPSKY, Y. A.; SHELTON, D. R. **Performance of Weibull and Linear Semi-logarithmic Models in Simulating Escherichia coli Inactivation in Waters.** Journal of Environmental Quality, v. 43, n. 5, p. 1559–1565, set. 2014.

SYLVESTRE, É. et al. **Can routine monitoring of E. coli fully account for peak event concentrations at drinking water intakes in agricultural and urban rivers?** Water Research, v. 170, p. 115369, mar. 2020.

TAVARES, T. D. M.; DE PAULA CARDOSO, D. D. D.; DIEDERICHSEN DE BRITO, W. M. E. **Vírus Entéricos Veiculados por Água: Aspectos Microbiológicos e de Controle de Qualidade da Água.** Revista de Patologia Tropical, v. 34, n. 2, 19 out. 2007.

TEIXEIRA, J. C.; LEAL, F. C. T.; HALFELD, R. **Desafios no Controle de Doenças de Veiculação Hídrica Associadas ao Tratamento e ao Abastecimento de Água para Consumo Humano.** . Em: VI SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2002.

TEUNIS, P. F. M.; OGDEN, I. D.; STRACHAN, N. J. C. **Hierarchical dose response of E. coli O157:H7 from human outbreaks incorporating heterogeneity in exposure.** *Epidemiology and Infection*, v. 136, n. 6, p. 761–770, jun. 2008.

TEUNIS, P.; TAKUMI, K.; SHINAGAWA, K. **Dose response for infection by Escherichia coli O157:H7 from outbreak data.** *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, v. 24, n. 2, p. 401–407, abr. 2004.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de Água de Chuva para Áreas Urbanas e Fins Não Potáveis.** São Paulo: Navegar Editora, 2003.

USEPA. **Guidelines for Water Reuse.** Washington: U.S. Agency for International Development, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. 2: Wastewater use in agriculture.** Geneva: World Health Organization, 2006a.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. 4: Excreta and greywater use in agriculture.** Geneva: World Health Organization, 2006b.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guidelines for drinking-water quality** [electronic resource]: incorporating 1st and 2nd addenda, Vol.1, recommendations. 3rd ed. Geneva: World Health Organization, 2008.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management.** Geneva: World Health Organization, 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum.** 4th ed + 1st add ed. Geneva: World Health Organization, 2017.

ZANETI, R. N. et al. **Riscos químicos, microbiológicos e pré-avaliação econômica no reúso de água. Estudo de caso: Lavagem de veículos.** 26º Anais. Anais... Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Porto Alegre: 2011.

ZHITENEVA, V. et al. **Trends in conducting quantitative microbial risk assessments for water reuse systems: A review.** *Microbial Risk Analysis*, v. 16, p. 100132, dez. 2020.

ZHU, S.; CAMPANELLA, O.; CHEN, G. **Estimation of parameters in the Weibull model from microbial survival data obtained under constant conditions with come-up times.** *Journal of Food Engineering*, v. 292, p. 110364, mar. 2021.

APÊNDICE A – Concentrações de Escherichia coli – ETE de Florianópolis

Data análise	Esgoto Bruto <i>E. coli</i> (NMP/100mL)	Efluente Tratado <i>E. coli</i> (NMP/100mL)	Remoção (Unidades de log₁₀)
21/02/2013	4,10E+08	7,50E+04	3,7
18/03/2013	2,40E+07	1,00E+00	7,4
05/04/2013	4,20E+06	2,70E+02	4,2
09/05/2013	4,10E+07	1,20E+05	2,5
26/06/2013	6,10E+07	6,80E+04	3,0
23/08/2013	2,40E+08	8,20E+01	6,5
22/11/2013	5,70E+06	1,00E+00	6,8
06/01/2014	3,90E+07	1,30E+03	4,5
18/02/2014	1,90E+07	1,00E+00	7,3
17/03/2014	1,40E+07	1,30E+02	5,0
26/03/2014	1,20E+07	1,10E+02	5,0
07/05/2014	2,00E+07	9,60E+02	4,3
18/06/2014	5,00E+06	1,30E+03	3,6
23/07/2014	9,90E+06	5,20E+00	6,3
30/09/2014	1,30E+07	1,00E+00	7,1
07/11/2014	9,80E+06	1,00E+02	5,0
24/11/2014	1,60E+07	5,50E+02	4,5
05/12/2014	1,60E+07	2,90E+01	5,7
08/12/2014	2,30E+07	2,30E+04	3,0
09/02/2015	9,30E+06	6,80E+02	4,1
25/02/2015	1,50E+07	9,80E+03	3,2
09/04/2015	2,10E+07	5,90E+03	3,6
27/04/2015	7,50E+06	5,70E+04	2,1
29/06/2015	1,30E+07	2,60E+05	1,7
13/07/2015	1,00E+07	5,70E+04	2,2
27/07/2015	1,20E+07	2,40E+04	2,7
10/08/2015	1,10E+07	6,30E+02	4,2
24/08/2015	2,70E+07	3,40E+04	2,9
10/09/2015	1,00E+07	9,30E+03	3,0
23/10/2015	4,10E+06	9,30E+02	3,6
05/11/2015	4,30E+06	1,40E+04	2,5
11/01/2016	1,20E+07	4,60E+04	2,4
11/02/2016	1,70E+07	2,00E+01	5,9
30/03/2016	1,20E+07	1,00E+04	3,1
07/04/2016	1,20E+07	2,00E+04	2,8
08/06/2016	4,30E+06	7,40E+02	3,8
22/08/2016	1,20E+07	1,50E+02	4,9
14/10/2016	2,30E+07	4,30E+02	4,7
26/10/2016	2,30E+06	1,90E+05	1,1
28/12/2016	1,40E+07	1,00E+02	5,1

06/04/2017	1,00E+08	2,80E+01	6,6
01/06/2017	1,30E+06	9,80E+03	2,1
17/07/2017	6,30E+06	1,00E+01	5,8
12/09/2017	2,60E+07	1,30E+04	3,3
26/09/2017	3,90E+06	2,70E+02	4,2
26/10/2017	3,80E+06	1,00E+01	5,6
13/11/2017	1,60E+07	2,40E+04	2,8
23/02/2018	1,50E+08	2,00E+01	6,9
15/05/2018	3,44E+07	1,13E+02	5,5
09/07/2018	4,35E+07	1,55E+04	3,4
23/07/2018	2,09E+07	2,56E+03	3,9
13/08/2018	3,20E+07	2,70E+04	3,1
10/09/2018	1,72E+07	5,04E+02	4,5
08/10/2018	8,60E+06	1,00E+02	4,9
22/10/2018	2,41E+08	1,16E+04	4,3
12/11/2018	1,72E+07	2,41E+05	1,9
14/01/2019	2,14E+07	1,00E+01	6,3
28/01/2019	3,44E+07	1,32E+02	5,4
11/02/2019	2,48E+07	1,00E+01	6,4
25/02/2019	2,75E+07	5,48E+03	3,7
13/03/2019	5,47E+07	1,48E+03	4,6
25/03/2019	3,60E+07	1,00E+01	6,6
05/04/2019	9,60E+07	1,00E+01	7,0
16/04/2019	5,79E+07	1,35E+02	5,6
13/05/2019	2,85E+07	1,56E+02	5,3
18/06/2019	5,47E+07	1,00E+02	5,7
08/07/2019	1,14E+07	2,09E+02	4,7
22/07/2019	1,14E+07	1,00E+01	6,1
12/08/2019	4,61E+07	1,00E+01	6,7
26/08/2019	6,48E+07	1,00E+01	6,8
09/09/2019	2,01E+07	1,00E+01	6,3
23/09/2019	8,66E+07	1,00E+01	6,9
09/12/2019	9,20E+07	2,42E+04	3,6
20/12/2019	5,47E+07	1,73E+05	2,5
13/01/2020	7,27E+07	1,85E+04	3,6
27/01/2020	4,88E+07	2,42E+05	2,3
10/02/2020	2,19E+07	1,73E+04	3,1
28/02/2020	6,13E+07	5,48E+04	3,0
11/03/2020	2,22E+07	1,41E+05	2,2
14/04/2020	2,38E+07	1,00E+02	5,4
27/04/2020	1,46E+07	3,45E+03	3,6
11/05/2020	4,11E+07	6,83E+02	4,8
22/05/2020	1,53E+07	1,00E+01	6,2
08/06/2020	1,12E+07	4,10E+01	5,4
22/06/2020	1,13E+07	3,32E+02	4,5

13/07/2020	1,58E+07	1,73E+04	3,0
27/07/2020	1,94E+07	5,94E+02	4,5
10/08/2020	1,12E+08	1,04E+03	5,0
08/09/2020	2,59E+06	6,87E+05	0,6
22/09/2020	1,21E+07	1,00E+01	6,1
21/10/2020	3,45E+07	2,42E+04	3,2
09/11/2020	1,38E+07	1,00E+01	6,1
08/12/2020	1,38E+07	1,00E+02	5,1
21/12/2020	1,37E+07	1,62E+04	2,9
27/01/2021	6,97E+06	1,00E+02	4,8
12/02/2021	1,08E+07	1,00E+02	5,0
26/02/2021	6,63E+06	1,07E+04	2,8
12/03/2021	8,55E+06	1,00E+02	4,9
27/04/2021	9,59E+06	1,00E+02	5,0
24/05/2021	3,23E+06	1,00E+01	5,5
28/06/2021	6,57E+06	9,08E+04	1,9
12/07/2021	6,13E+06	5,56E+04	2,0
13/09/2021	5,48E+06	2,95E+03	3,3
27/09/2021	1,09E+07	8,50E+02	4,1
13/10/2021	7,43E+06	5,17E+04	2,2
08/11/2021	1,24E+07	1,56E+02	4,9
29/11/2021	2,05E+07	1,30E+06	1,2
13/12/2021	1,01E+07	1,00E+03	4,0
27/12/2021	1,22E+07	2,42E+05	1,7
10/01/2022	4,35E+07	3,00E+03	4,2
24/01/2022	1,73E+07	1,41E+06	1,1
07/02/2022	7,98E+06	1,00E+02	4,9
21/02/2022	1,66E+07	1,00E+01	6,2
14/03/2022	1,61E+07	7,70E+03	3,3
29/03/2022	1,41E+07	1,00E+01	6,1
11/04/2022	1,53E+07	1,00E+01	6,2
26/04/2022	8,60E+06	1,00E+01	5,9
09/05/2022	1,21E+07	1,00E+01	6,1
09/06/2022	3,59E+06	1,99E+04	2,3
27/06/2022	1,35E+07	1,55E+05	1,9
11/07/2022	9,88E+06	5,48E+05	1,3
25/07/2022	4,57E+06	6,70E+03	2,8
08/08/2022	5,63E+06	1,41E+05	1,6
22/08/2022	6,20E+06	1,00E+02	4,8
12/09/2022	1,01E+07	1,35E+04	2,9
26/09/2022	4,64E+06	2,42E+05	1,3
10/10/2022	2,88E+06	6,44E+04	1,7
25/10/2022	1,52E+07	1,00E+02	5,2
16/11/2022	1,24E+07	2,42E+05	1,7
29/11/2022	8,13E+06	8,16E+05	1,0

30/11/2022	9,33E+06	2,42E+05	1,6
12/12/2022	7,76E+06	8,88E+03	2,9
28/12/2022	1,19E+07	2,42E+05	1,7
09/01/2023	1,86E+07	3,65E+06	0,7
23/01/2023	1,92E+07	2,42E+05	1,9
07/02/2023	1,44E+07	3,08E+04	2,7
22/02/2023	1,40E+07	7,70E+05	1,3
06/03/2023	1,79E+07	4,87E+03	3,6
20/03/2023	3,28E+07	1,38E+03	4,4
10/04/2023	1,38E+07	1,99E+02	4,8
25/04/2023	1,40E+07	1,00E+01	6,1
08/05/2023	1,46E+07	8,40E+01	5,2
22/05/2023	1,35E+07	4,55E+02	4,5

Fonte: Elaboração Própria (2024)

**APÊNDICE B – CONCENTRAÇÕES DE ESCHERICHIA COLI PATOGÊNICA (8% DO
TOTAL)**

Data análise	<i>E. coli</i> patogênica (NMP/100mL)
21/02/2013	6,00E+03
18/03/2013	8,00E-02
05/04/2013	2,16E+01
09/05/2013	9,60E+03
24/05/2013	8,00E-01
26/06/2013	5,44E+03
23/08/2013	6,56E+00
22/11/2013	8,00E-02
06/01/2014	1,04E+02
18/02/2014	8,00E-02
17/03/2014	1,04E+01
26/03/2014	8,80E+00
07/05/2014	7,68E+01
18/06/2014	1,04E+02
23/07/2014	4,16E-01
30/09/2014	8,00E-02
07/11/2014	8,00E+00
24/11/2014	4,40E+01
05/12/2014	2,32E+00
08/12/2014	1,84E+03
09/02/2015	5,44E+01
25/02/2015	7,84E+02
09/04/2015	4,72E+02
27/04/2015	4,56E+03
29/06/2015	2,08E+04
13/07/2015	4,56E+03
27/07/2015	1,92E+03
10/08/2015	5,04E+01
24/08/2015	2,72E+03
10/09/2015	7,44E+02
23/10/2015	7,44E+01
05/11/2015	1,12E+03
11/01/2016	3,68E+03
11/02/2016	1,60E+00
30/03/2016	8,00E+02
07/04/2016	1,60E+03
08/06/2016	5,92E+01
22/08/2016	1,20E+01
14/10/2016	3,44E+01

26/10/2016	1,52E+04
28/12/2016	8,00E+00
06/04/2017	2,24E+00
01/06/2017	7,84E+02
17/07/2017	8,00E-01
12/09/2017	1,04E+03
26/09/2017	2,16E+01
26/10/2017	8,00E-01
13/11/2017	1,92E+03
23/02/2018	1,60E+00
15/05/2018	9,04E+00
09/07/2018	1,24E+03
23/07/2018	2,05E+02
13/08/2018	2,16E+03
10/09/2018	4,03E+01
08/10/2018	8,00E+00
22/10/2018	9,28E+02
12/11/2018	1,93E+04
14/01/2019	8,00E-01
28/01/2019	1,06E+01
11/02/2019	8,00E-01
25/02/2019	4,38E+02
13/03/2019	1,18E+02
25/03/2019	8,00E-01
05/04/2019	8,00E-01
16/04/2019	1,08E+01
13/05/2019	1,25E+01
18/06/2019	8,00E+00
08/07/2019	1,67E+01
22/07/2019	8,00E-01
12/08/2019	8,00E-01
26/08/2019	8,00E-01
09/09/2019	8,00E-01
23/09/2019	8,00E-01
09/12/2019	1,94E+03
20/12/2019	1,38E+04
13/01/2020	1,48E+03
27/01/2020	1,94E+04
10/02/2020	1,38E+03
28/02/2020	4,38E+03
11/03/2020	1,13E+04
14/04/2020	8,00E+00
27/04/2020	2,76E+02
11/05/2020	5,46E+01
22/05/2020	8,00E-01

08/06/2020	3,28E+00
22/06/2020	2,66E+01
13/07/2020	1,38E+03
27/07/2020	4,75E+01
10/08/2020	8,32E+01
08/09/2020	5,50E+04
22/09/2020	8,00E-01
21/10/2020	1,94E+03
09/11/2020	8,00E-01
08/12/2020	8,00E+00
21/12/2020	1,30E+03
27/01/2021	8,00E+00
12/02/2021	8,00E+00
26/02/2021	8,56E+02
12/03/2021	8,00E+00
27/04/2021	8,00E+00
24/05/2021	8,00E-01
28/06/2021	7,26E+03
12/07/2021	4,45E+03
13/09/2021	2,36E+02
27/09/2021	6,80E+01
13/10/2021	4,14E+03
08/11/2021	1,25E+01
29/11/2021	1,04E+05
13/12/2021	8,00E+01
27/12/2021	1,94E+04
10/01/2022	2,40E+02
24/01/2022	1,13E+05
07/02/2022	8,00E+00
21/02/2022	8,00E-01
14/03/2022	6,16E+02
29/03/2022	8,00E-01
11/04/2022	8,00E-01
26/04/2022	8,00E-01
09/05/2022	8,00E-01
09/06/2022	1,59E+03
27/06/2022	1,24E+04
11/07/2022	4,38E+04
25/07/2022	5,36E+02
08/08/2022	1,13E+04
22/08/2022	8,00E+00
12/09/2022	1,08E+03
26/09/2022	1,94E+04
10/10/2022	5,15E+03
25/10/2022	8,00E+00

16/11/2022	1,94E+04
29/11/2022	6,53E+04
30/11/2022	1,94E+04
12/12/2022	7,10E+02
28/12/2022	1,94E+04
09/01/2023	2,92E+05
23/01/2023	1,94E+04
07/02/2023	2,46E+03
22/02/2023	6,16E+04
06/03/2023	3,90E+02
20/03/2023	1,10E+02
10/04/2023	1,59E+01
25/04/2023	8,00E-01
08/05/2023	6,72E+00
22/05/2023	3,64E+01

Fonte: Elaboração Própria (2024)