1278 - ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE POLIMENTO DE EFLUENTES TRATADOS PARA REÚSO AGRÍCOLA IRRESTRITO COM BASE EM PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS

Matheus Dos Santos Ferro[(1)]
Biólogo com ênfase em Meio Ambiente (UERJ) e Mestrando em Engenharia Ambiental e Sanitária (UERJ).

Marcelo Obraczka[(2)]
Engenheiro Civil e Sanitarista, Doutorado em Planejamento Energético (PPE/COPPE/UFRJ).

Marcelo Manzi Marinho[(2)]
Prof. Associado UERJ, Laboratório de Ecologia e Fisiologia do Fitoplâncton, DBV/IBRAG.

Marcella Coelho Berjante Mesquita[(2)]
Bióloga, Doutora em Biologia Vegetal (PGBV/UERJ), Laboratório de Ecologia e Fisiologia do Fitoplâncton, DBV/IBRAG.

Pietra Sissiliana Vilchez Rabanal [(3)]
Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária (UERJ).

Endereço[(1)]**:** Rua Anatole France, 181 - Realengo – Rio de Janeiro – Rio de Janeiro - CEP: 21760-070 - Brasil - Tel: +55 (21) 99956-8923 - e-mail: **matheus.ferro074@gmail.com**

RESUMO

O reúso agrícola da água se configura como uma alternativa sustentável diante da crescente demanda por recursos hídricos, contribuindo para a conservação da água potável e a redução do uso de fertilizantes, ao aproveitar os nutrientes presentes nos efluentes. No entanto, a grande diversidade de normas e limites, bem como as limitações de eficiência de alguns sistemas de tratamento são entraves a uma maior garantia de segurança sanitária para seu uso irrestrito na agricultura.

O presente estudo realizou o levantamento e a análise de documentos normativos relacionados ao reúso agrícola irrestrito, juntamente com a avaliação laboratorial da eficiência de um sistema de polimento composto por uma coluna de adsorção e membrana de ultrafiltração. O objetivo foi verificar se esse sistema atende aos limites microbiológicos exigidos por legislações nacionais e internacionais, garantindo maior segurança sanitária na irrigação de culturas e reduzindo os riscos à saúde dos consumidores.

Para alimentar o sistema de polimento foi utilizado o efluente tratado (ET) da ETE da ACTION, situada em Cachoeiras de Macacu, RJ, onde já existe um projeto de fertirrigação de culturas perenes. Os resultados indicaram que o (ET) não atende aos padrões mais exigentes de reúso irrestrito, devido às altas concentrações de patógenos no afluente e as limitações inerentes ao processo de tratamento e remoção de poluentes do sistema de lagoas. Embora eficiente na redução média de 72% desses microrganismos, a coluna de adsorção não se demonstrou suficiente para adequar aos limites para parâmetros microbiológicos mais restritivos exigidos, por sua limitação em cenários de carga elevada e alta concentração inicial de patógenos no ET. Por outro lado, após a sequência de etapas de adsorção e ultrafiltração, o efluente permeado (EP), apresentou redução superior a 95% na carga de patogênicos, atendendo os limites menos restritivos e intermediários de diversas normas, embora ainda não atendendo integralmente às demandas de legislações mais exigentes que requerem ausência total de E. coli e helmintos.

Conclui-se que o sistema testado é bastante eficaz na melhoria da qualidade microbiológica da água, podendo conferir maior segurança ao ser aplicado em situações de reúso agrícola restrito e, em parte, irrestrito. Não obstante, para garantir a conformidade dos parâmetros de controle em relação aos padrões sanitários mais exigentes, são recomendadas melhorias operacionais no sistema, como a inclusão de etapas complementares de tratamento/polimento, tais como coagulação-floculação e desinfecção.

PALAVRAS-CHAVE: Efluentes | Reúso na agricultura | Sistemas de polimento | Fertirrigação | Recursos hídricos

INTRODUÇÃO

De acordo com a Declaração Universal dos Direitos da Água, lançada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1992, a água é reconhecida como um direito fundamental para a vida animal e vegetal, devendo ser assegurada a todos os seres humanos de forma igualitária e em boa qualidade. Contudo, o aumento populacional, o intenso desenvolvimento econômico e seus desdobramentos, juntamente com as mudanças nos padrões de consumo, têm impostos sérios desafios à garantia efetiva desse direito (ROLIM *et al.*2016).

Atualmente, mais de 2 bilhões de pessoas em todo o mundo vivem em países que enfrentam situações de estresse hídrico, caracterizado pela insuficiência do volume de água para atender às necessidades básicas da população (GIACCHINI, 2011; MEKONNEN e HOEKSTRA *et al.*2016). Quando inseridas no contexto das mudanças climáticas, as projeções indicam que cerca de 4 bilhões de pessoas podem residir em áreas sujeitas à grave escassez de água por pelo menos um mês ao ano (MEKONNEN e HOEKSTRA *et al.* 2016).

Nesse cenário, torna-se imprescindível a implementação de diversas medidas para a preservação e recuperação da qualidade das águas. Dentre essas medidas, destaca-se o emprego de água de reúso, que é caracterizada como aquela previamente utilizada em atividades industriais, domésticas, agrícolas ou comerciais, submetida a um sistema de tratamento para ser reaproveitada em outras finalidades de interesse segundo sua qualidade (LAVRADOR, 1987).

Na atualidade, a agricultura representa 70% do consumo global de água, sendo direcionada principalmente para a irrigação de lavouras (PIMENTEL, 2007). A incorporação da água de reúso nesse setor promove a conservação hídrica ao reduzir a pressão sobre as fontes convencionais de água doce. Adicionalmente, com os íons dissolvidos naturalmente presentes nas águas residuais, a irrigação com água de reúso contribui para o aumento dos nutrientes na cultura e a estabilização e condicionamento do solo, fatores que propiciam a redução do uso de fertilizantes e outros produtos químicos (JARAMILLO e RESTREPO, 2017; MOSCOSO, 2017).

Embora se apresente como uma boa estratégia para a preservação de recursos hídricos, apenas 22% de todo o esgoto tratado globalmente é aproveitado como água de reúso para qualquer finalidade (JONES *et al*. 2021).

Entraves como a grande variação de indicadores e limites legais de parâmetros de qualidade de água nas normas, aliada ao emprego de tratamentos muitas vezes insuficientes, dificultam uma maior garantia quanto à segurança química e biológica do reúso agrícola (ANGELAKIS, 2018; SCARPA, 2011; VERBYLA *et al*. 2015).

Os perigos para a saúde podem decorrer da exposição a substâncias químicas ou fármacos que permanecem em concentrações elevadas na água de reúso (CHEN *et al*. 2011), além dos riscos biológicos relacionados aos microrganismos patogênicos, como coliformes, parasitas e vírus, que são amplamente encontrados, e ainda persistem em várias etapas do tratamento de efluentes (MANCUSO e SANTOS, 2003). Várias pesquisas estabeleceram correlações entre surtos de infecções diarreicas e parasitárias, além de diversas condições cutâneas e sistêmicas, relacionadas à utilização de águas residuais tratadas com diferentes níveis de qualidade para fins de irrigação (CONTRERAS, 2017; TRANG *et al*. 2007; LAM *et al*. 2015; OKOH, 2010).

Vale destacar que, a simples presença desses microrganismos não implica necessariamente a transmissão de doenças. A contaminação pode depender de várias variáveis, como o grau de patogenicidade do microrganismo, as condições imunológicas e nutricionais da pessoa, e o tipo de exposição envolvida (HESPANHOL, 2002; MANCUSO e SANTOS, 2003).

A contaminação por patógenos pode ocorrer em qualquer modo de irrigação com água de reúso, embora algumas modalidades que restrinjam o contato direto da água com o fruto sejam menos arriscadas, como por exemplo, a irrigação por gotejamento. O risco é maior quando há contato direto com a água de reúso, como na irrigação por aspersão, que pode contaminar alimentos destinados ao consumo humano e animal, além de oferecer riscos pela inalação de aerossóis e contato com a pele (MANCUSO e SANTOS, 2003). Em função dessas práticas diferenciadas de manejo agrícola na irrigação das culturas, os marcos normativos estabelecem limites microbiológicos bem mais rigorosos para o uso irrestrito comparados aos usos restritos.

A adoção de critérios mais exigentes para o emprego da água de reúso na agricultura, aliada à melhoria dos processos de tratamento utilizados, pode contribuir para elevar a segurança sanitária e para redução dos riscos inerentes a tais práticas.

Diversos estudos têm se dedicado a desenvolver tecnologias para melhorar a qualidade da água de reúso, através de uma maior eficiência no tratamento, de modo a cumprir os requisitos das legislações em vigor e atender a demandas mais rigorosas para garantir a segurança no seu uso (CESCON, 2020; GÖNDER, 2011).

Diversas tecnologias de tratamento e polimento podem ser empregadas para adequar os parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água de reúso e atender as exigências das normas e especificações. Entre elas, podem ser citados o emprego de dispositivos com múltiplas camadas de filtragem (meios filtrantes) associados a sistemas de membranas, como a ultrafiltração.

OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho e a eficiência de um sistema de polimento em escala laboratorial, composto por uma coluna de adsorção e membrana de ultrafiltração, utilizando o efluente tratado de uma ETE e tendo como base o atendimento de limites de parâmetros microbiológicos para reúso agrícola irrestrito. Objetivou-se verificar a capacidade do sistema estudado em atender aos parâmetros microbiológicos mais rigorosos estabelecidos por normas nacionais e internacionais, e assim poder proporcionar maior segurança biológica e menores riscos no emprego da água de reúso destinada à irrigação irrestrita de culturas.

METODOLOGIA

As amostras de efluentes tratado utilizadas foram provenientes da ETE da empresa ACTION Tratamento de Resíduos LTDA, localizada no distrito de Papucaia, município de Cachoeiras de Macacu, Estado do Rio de Janeiro, Brasil (Figura 1).

A empresa possui uma Outorga de Licença de Recursos Hídricos (UM036623/35.31.06), que autoriza o lançamento de resíduos tratados no Rio Macacu, com vazões variando entre 25 e 30 m³/h (DA SILVA *et al*. 2023).

O esgoto bruto que é tratado na ETE da ACTION provém de fossas, tanques sépticos, banheiros químicos e efluentes industriais de diversos empreendimentos, obras e eventos de clientes da empresa (DA SILVA *et al*., 2023; CARVALHO *et al*. 2023).

O sistema de tratamento existente na ETE consiste em uma série de três lagoas de estabilização com formato retangular e seção trapezoidal, e o fundo das lagoas é revestido por uma geomembrana de polietileno. Cada lagoa possui uma área de espelho d'água de aproximadamente 1 hectare e uma profundidade máxima de 2,5 metros. As duas primeiras lagoas são aeradas mecanicamente e cada uma delas apresenta o volume de 3.500 m³, enquanto a terceira possui 1.500 m³ (DA SILVA *et al*., 2023; CARVALHO *et al*. 2023). O tempo de detenção teórico varia entre 19 e 22,5 dias (DA SILVA *et al*., 2023). Após a última lagoa, o efluente tratado é lançado no Rio Macacu.

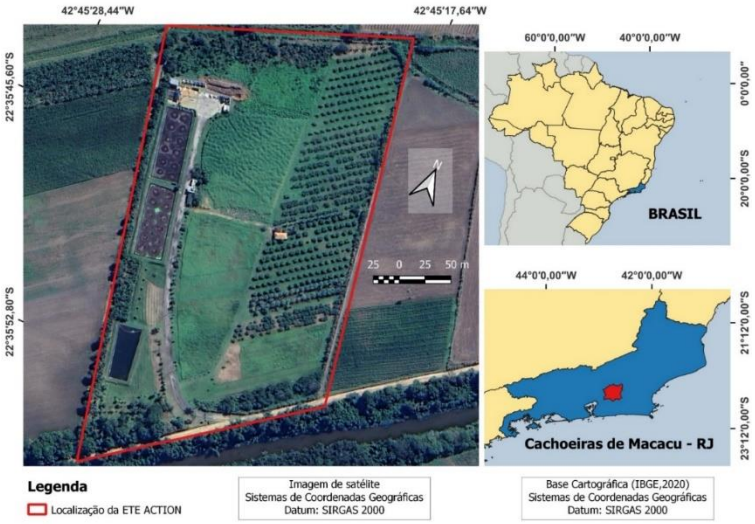

Figura 1 - Mapa de localização da ETE da empresa ACTION.
Fonte: retirado de Carvalho (2023).

Desde 2015, a ACTION mantém um projeto em parceria com a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária (PESAGRO), no qual cerca de 10% do efluente tratado pela ETE é utilizado para irrigação restrita de culturas de limão e goiaba, em uma área de aproximadamente 4 hectares próxima às lagoas do sistema de tratamento.

A irrigação é realizada por meio de sistemas de microaspersão e gotejamento, evitando o contato direto da água com os frutos. Não há aplicação de cloro na água de reúso antes da irrigação das culturas e para a comercialização ou consumo, os frutos são devidamente lavados (DA SILVA *et al*. 2023; CARVALHO *et al*. 2023).

Para definir os parâmetros microbiológicos e os limites aplicáveis à água de reúso para fins agrícolas com uso irrestrito a serem utilizados no trabalho, foram analisados 25 documentos internacionais, incluindo regulamentos, diretrizes e normas (Tabela 2). Como o Brasil não possui um instrumento normativo de âmbito nacional específico, foram considerados os quatro marcos regulatórios/leis estaduais que estabelecem distinções para uso irrestrito: São Paulo, Ceará, Minas Gerais e Rio Grande do Sul (Tabela 1).

Com base no levantamento dos parâmetros mais usuais encontrados, foram definidos os limites para reúso irrestrito a serem utilizados.

Tabela 1 – Parâmetros microbiológicos para uso irrestrito em âmbito internacional.

País – Documento normativo – Ano	***E.coli***	**Coliformes Termotolerantes**	**Coliformes totais**	**Ovos De helmintos (Ovos/L)**	***Enterococcus***	***Salmonella***
EUA – Diretriz EPA (2012)	-	ND	-	-	-	-
Austrália – Diretriz AGWR (2006)	1	-	-	-	-	-
Chipre – Regulamento K.D.269 (2005)	5	15	-	ND	-	-
Itália – Regulamento do Comitê Nacional Interministerial para a Proteção das Águas da Poluição (1977)	10	-	-	-	-	-
Grécia – Regulamento Ministerial nº 145116 (2011)	50	-	-	-	-	-
Israel - Diretriz israelense para reutilização de águas residuais (2007)	-	10	-	-	-	-
Comissão Europeia - Regulamento 2020/741 (2020)	10	-	-	1	-	-
Jordânia - Padrão jordaniano JS: 893 (2002)	100	100	-	1	-	-
Kuwait - Padrão da autoridade pública ambiental do Kuwait (2001) (A)	-	20	400	-	-	
Arábia Saudita – Diretriz Técnica para o Uso de Águas Residuais Sanitárias Tratadas na Irrigação (2006)	-	2,2	-	1	-	-
México - Norma NOM-001-ECOL (1996)	-	1000	-	-	-	-
França - Critérios de reutilização de água para irrigação (1991)	100	-	-	-	10	-
Espanha - Decreto Real 1620 para a Reutilização de Águas Tratadas (2007)	100	-	-	1	-	-
Irã - Critérios para utilização de água reciclada (2010)	-	1000	-	1	-	-
Egito – Relatório nº 34, Ministério Egípcio de Recursos Hídricos e Irrigação (2005)	1000	-	-	-	-	
Palestina - Norma Palestina para Tratamento e Reutilização de Águas Residuais (2005)	-	200	-	-	-	-
China – Padrão GB20922 (2007)	-	20.000	-	2	-	-
Portugal – Norma NP 4434 (2006)	-	100	-	-	-	-
Omã – Regulamento n.º 145 sobre a reutilização e descarga de águas residuais (1993)	-	200	-	1	-	-
Marrocos – Normas de qualidade para água de irrigação n.º 1276-01 (2002)	-	1000	-	ND	-	ND
África do Sul – Diretriz 85/97 para utilização e disposição de esgoto (1997)	-	1000	-	-	-	-
Japão – Diretriz técnica sobre Reutilização de Águas Residuais Tratadas (1995)	-	50	-	-	-	-
ISO - Padrão ISO 16075 (2020)	-	100	-	1	-	-
FAO – Diretriz para o uso seguro de águas residuais, excrementos e águas cinzas - volume II — uso de águas residuais na agricultura (1973)	-	1000	-	1	-	-
OMS – Diretrizes para reutilização de água de reuso na agricultura (2006)	1000	-	-	1	-	-

Legenda: (-) Sem recomendação. (ND) Não Detectável. (A) Padrão Kuwaitiano não havia distinção no modo de irrigação.
Nota: Com exceção dos Ovos e larvas de helmintos, todos os outros parâmetros estão em unidade Número Mais Provável em 100mL (NMP/100mL)
Fonte: adaptado de ORTEGA-POZO et al., 2022; SHOUSHTARIAN e NEGAHBAN-AZAR, 2020.

Tabela 2 – Parâmetros microbiológicos para uso restrito em quatro legislações estaduais brasileiras

Parâmetros Brasileiros microbiológicos	Bahia (Resolução CONERH N° 75)	Ceará (Resolução COEMA N° 2)	São Paulo (Lei SES/SIMA N° 01)	Minas Gerais (Resolução CERH-MG N° 65)
Coliformes Termotolerantes Ou *E.coli* (NMP/100mL)	≤ 1000 (C)	ND	ND	≤ 10.000
Giárdia spp. e Cryptosporidium (cistos/)	-	-	ND (4)	-
Ovos de helmintos (ovos/L)	≤ 1	ND	0,1 - 1	≤ 1

Legenda: (-) Sem recomendação. (ND) Não Detectável.

Os limites foram confrontados com os resultados obtidos nas amostras analisadas, no intuito de verificar se o sistema de polimento é capaz de atender altos níveis de segurança microbiológica através dos parâmetros/limites das normas mais restritivas, viabilizando o reúso de água para irrigação em qualquer tipo de cultivo, além dos já praticados pela ACTION.

Sistema de polimento operado em escala laboratorial

Operado em escala laboratorial no Laboratório de Engenharia Sanitária (LES) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), o sistema de polimento de efluente tratado foi composto por uma sequência de coluna de adsorção e uma membrana de ultrafiltração.

A coluna de adsorção é um sistema experimental de filtração de bancada composto por um corpo externo de PVC com 150 mm de diâmetro e 80 cm de altura. Possui duas camadas de materiais filtrantes/adsorventes: uma de mídia porosa de vidro sinterizado em formato hexagonal, com 35 cm de altura, e outra de carvão ativado granulado, com 25 cm de altura (Figura 2). Seu objetivo é reter partículas finas e adsorver substâncias orgânicas presentes na água (ALMEIDA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2020).

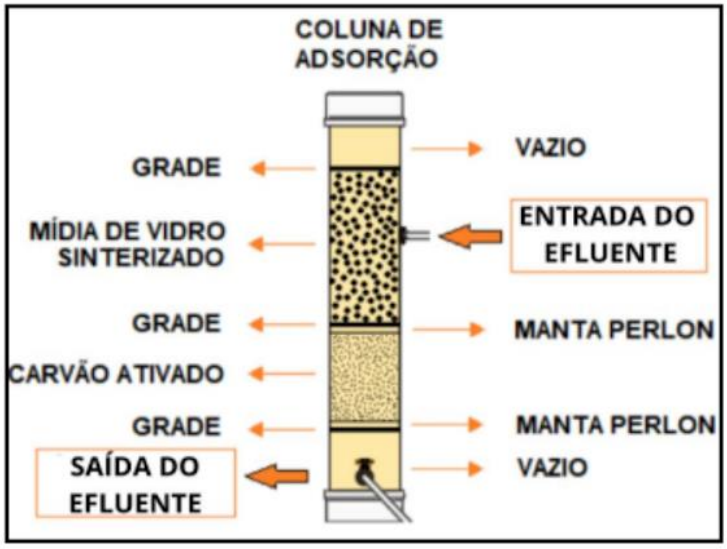

Figura 2 - Corte esquemático da Coluna de Adsorção.
Fonte: Retirado de Almeida (2023).

A membrana de ultrafiltração utilizada está inserida no equipamento portátil *LifeStraw Community*, cedido pela empresa Vestergaard (Figura 3). Este sistema opera por gravidade, sem necessidade de produtos químicos ou energia elétrica. Conta com um cartucho de ultrafiltração de 20 nm, com vazão média de 12 litros por hora, e um reservatório de água tratada com capacidade para 25 litros (ALMEIDA *et al*.2022; VESTERGAARD, 2014).

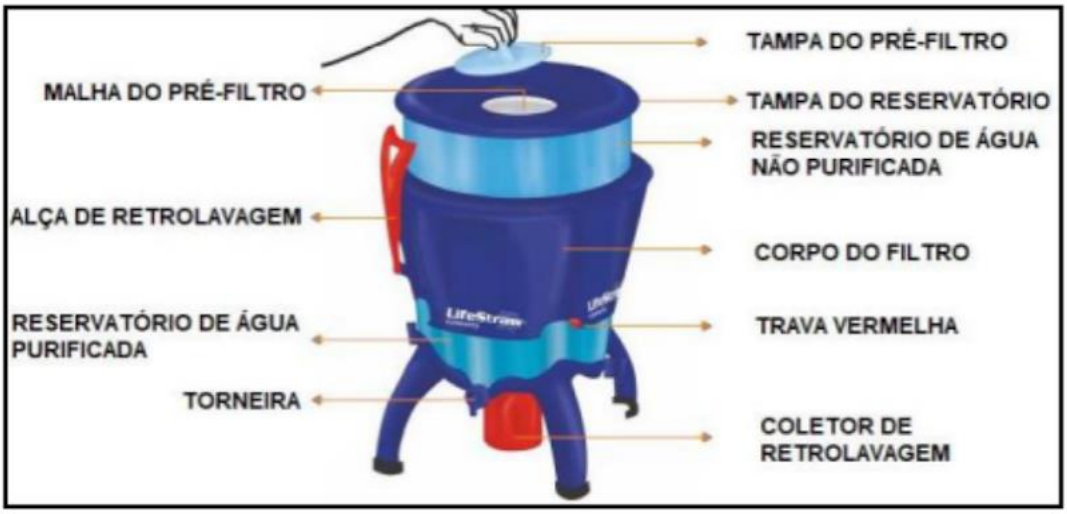

Figura 3 - Membrana de ultrafiltração portátil modelo LifeStraw Community.
Fonte: Retirado de Almeida (2023).

Ao longo do primeiro semestre de 2024, foram realizadas cinco coletas mensais de efluente tratado a jusante da terceira lagoa da ETE ACTION: a) janeiro (16/01/2024); b) fevereiro (20/02/2024); c) abril (09/04/2024); d) maio (07/05/2024) e e) junho (18/06/2024).
Além das amostras de efluente tratado, coletadas a jusante da terceira lagoa da ACTION), as demais amostras para análise foram coletadas em dois pontos do sistema de polimento: Efluente Filtrado (EF, após filtração na coluna de adsorção) e Efluente Permeado (EP, após filtração na coluna de adsorção + membrana de ultrafiltração) (Figura 4).

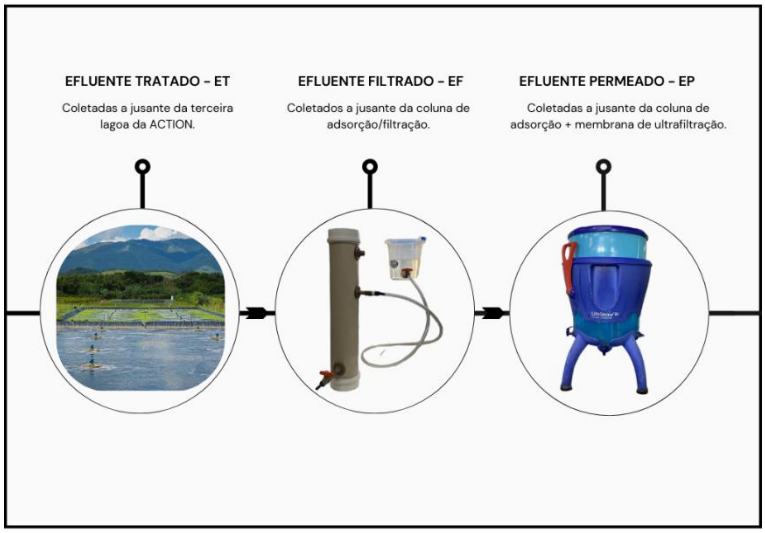

Figura 4 – Esquema metodológico do experimento abrangido pelo estudo.
Fonte: Autoria própria

Os parâmetros microbiológicos definidos por legislações e diretrizes internacionais foram analisados em laboratórios terceirizados e no LES-UERJ, seguindo os protocolos do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2023). As análises contemplaram os seguintes parâmetros: ovos e larvas viáveis de helmintos (10750), *Salmonella* spp. (9260 B), coliformes totais e termotolerantes pelo método fermentativo (9221 A, B, C e E), coliformes totais e *Escherichia coli* pelo método do substrato cromogênico (9223 A e B), e *Enterococcus* spp. pelo método de membrana filtrante (9230 A e C).
Com exceção das análises de *Salmonella* spp. e ovos e larvas viáveis de helmintos, que foram realizadas apenas em dois pontos (ET e EP), os demais parâmetros foram avaliados nos três pontos de coleta de amostras do processo (ET, EF e EP).

Para o tratamento estatístico dos dados obtidos foi utilizado o Excel 365, com o cálculo de valores máximos, mínimos, médias, desvio padrão e porcentagem de redução das concentrações de parâmetros microbiológicos a jusante de cada etapa (EF e EP).
Os gráficos boxplot foram gerados no programa SigmaPlot 14.0 versão desktop, no qual apresenta a distribuição dos resultados e os limites das legislações levantadas, facilitando a visualização dos resultados do estudo e sua adequação esses limites.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta uma compilação dos resultados das análises microbiológicas do estudo, incluindo média, desvio padrão, valores máximo e mínimo após cinco campanhas realizadas ao longo de 2024.

Tabela 3 – Compilados dos resultados das análises microbiológicas com médias, desvio padrão e valores mínimos e máximo por ponto de coleta investigado

Parâmetros Microbiológicos analisados	**Médias, desvio padrão e valores mínimos e máximo por ponto investigado**		
	ET (efluente da terceira lagoa da ACTION)	**EF** (a jusante da coluna de adsorção/filtração)	**EP** (após a membrana de ultrafiltração)
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	2048 ± 2861	181 ± 147	< 2 ± 0
	20 – 9200	< 2 – 490	< 2 – < 2
Coliformes totais (NMP/100mL)	9420 ± 5264	4216 ± 4714	25 ± 21
	2400 – >16000	240 – >16000	5 – 79
E.coli (NMP/100mL)	1918 ± 2912	147 ± 174	1,80 ± 0,06
	<1,80 – 9200	<1,80 – 490	<1,80 – 2,0
Ovos e larvas viáveis de helmintos (Ovos e larvas/L)	1,06 ± 0,58	-	0,28 ± 0,05
	0,20 – 2,50	-	<0,10 – 0,60
Salmonella spp. (NMP/100mL)	321,44 ± 511,42	-	<1,80*
	<1,80 – >1600	-	<1,80*
Enterococcus	<1 *	<1 UFC/100mL*	<1 *

Legenda: (-) Ponto não analisado. (±) desvio padrão (*) valores abaixo do limite mínimo de detecção

A Tabela 4 apresenta os resultados de eficiência do sistema de polimento na remoção dos parâmetros microbiológicos analisados. As duas primeiras colunas indicam a eficiência de remoção nas duas etapas do tratamento em comparação aos valores do ET, enquanto a terceira coluna compara os valores do EP em relação ao EF, permitindo identificar a evolução do processo ao longo do sistema de polimento. Para o parâmetro *Salmonella* spp. não foi possível calcular uma média, pois quatro das cinco amostras do ET analisadas apresentaram valores no limite mínimo de detecção.

Tabela 4 – Compilados dos resultados da eficiência de remoção das análises microbiológicas pelo sistema de polimento

Parâmetros Microbiológicos analisados	**Média da Porcentagem de redução dos tratamentos em relação ao ET**		**Média da Porcentagem de redução dos tratamentos em relação ao EF**
	EF (a jusante da coluna de adsorção/filtração)	**EP** (após a membrana de ultrafiltração)	**EP** (após a membrana de ultrafiltração)
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	74,15 %	97,64 %	89,40 %
Coliformes totais (NMP/100mL)	63,81 %	99,67 %	92,27 %
E.coli (NMP/100mL)	76,78 %	95,35 %	69,60 %

Ovos e larvas viáveis de helmintos (Ovos e larvas/L)	-	63,01 %	-

Legenda: (-) Ponto não analisado.

Os coliformes termotolerantes, ou coliformes fecais, constituem um subgrupo de bactérias coliformes que fermentam lactose a temperaturas elevadas, em torno de 44,5°C (LIBÂNIO, 2010; APHA, 2023). Os gêneros mais representativos incluem *Escherichia* (principalmente *Escherichia coli*, que corresponde a cerca de 90% das espécies*), Citrobacter*, *Klebsiella* e *Enterobacter*, e essas bactérias podem ser encontradas não só em ambientes poluídos, mas também em corpos d'água, solos e plantas (LIBÂNIO, 2010). Embora os coliformes termotolerantes tenham sido amplamente utilizados como principal indicador de contaminação fecal em legislações nacionais e internacionais, observa-se uma lenta e gradual substituição pela análise de *E. coli* em razão do desenvolvimento de métodos específicos mais confiáveis para identificar exclusivamente a presença de poluição fecal (APHA, 2023). No entanto, a exigência de monitoramento dos coliformes termotolerantes ainda permanece em muitas regulamentações, não apenas pela sua relevância na detecção e quantificação da contaminação fecal, mas também devido à necessidade de compreender a flora microbiana presente na água, sendo algumas dessas bactérias, como *Klebsiella*, um risco significativo de infecções intestinais em humanos (APHA, 2023).

O limite mínimo de detecção da análise de coliformes termotolerantes adotado pelo laboratório externo foi de 2 NMP/100mL, valor identificado em todas as amostras do EP. O EP apresentou uma remoção média de 97,64% do parâmetro em relação ao ET e de 89,40% em relação ao EF. O ET teve média de 2048,0 ± 2860,8 NMP/100mL, enquanto o EF apresentou 181,4 ± 146,9 NMP/100mL, resultando em uma eficiência de remoção do EF para o ET de 74,15%.

Para comparação normativa, foi adotado o limite mínimo de detecção com base na Diretriz da Arábia Saudita (2006) com até 2 NMP/100ml, sendo também analisadas normativas mais restritivas, como as de São Paulo e Ceará, e a Diretriz EPA (EUA), que exigem a ausência deste patógeno para uso irrestrito. Adicionalmente, agruparam-se como legislações menos restritivas aquelas que estabelecem limite de até 1.000 NMP/100 mL, incluindo as normas do México, Irã, Marrocos, África do Sul, OMS e o no Brasil no estado da Bahia.

Com relação ao enquadramento das amostras analisadas em relação às distintas normas e legislações, o ET não apresentou nenhuma amostra em conformidade com os limites das legislações mais restritivos e intermediários, e somente uma amostra, a de janeiro/24, esteve abaixo dos limites menos restritivos, com 20 NMP/100mL.

O EF, por sua vez, teve apenas a amostra de janeiro/24 dentro do limite intermediário, com 2 NMP/100mL, porém todas as outras amostras permaneceram acima dos limites menos restritivo e intermediário adotados.

Por outro lado, o EP foi o único a apresentar valores consistentemente abaixo dos limites de todas as legislações, incluindo a mais restritiva, quando considerado que o valor mínimo de detecção foi adotado (Figura 5).

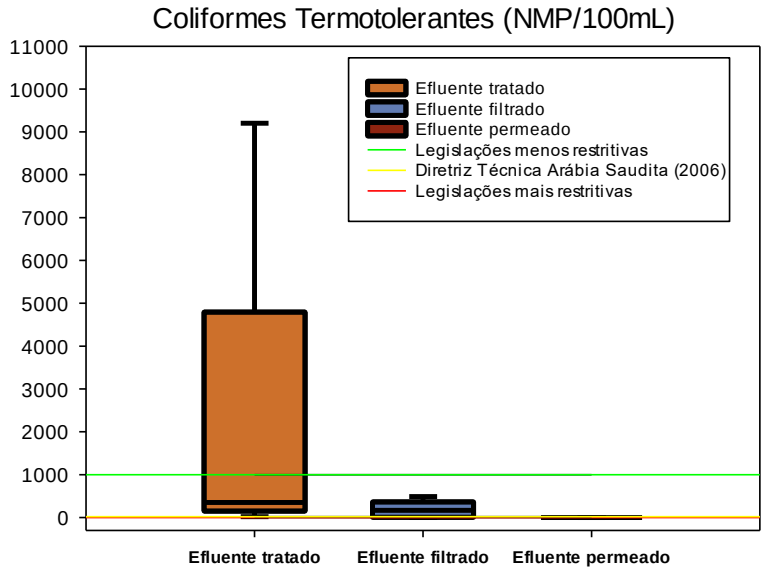

Figura 5 – Box Plot do parâmetro Coliformes termotolerantes por ponto de análise

Nota: (Legislações com limites menos restritivos) Norma mexicana NOM-001-ECOL (1996); Critérios iranianos para utilização de água reciclada (2010); Normas marroquinas de qualidade para água de irrigação n.º 1276-01 (2002); Diretri Sul Africana 85/97 para utilização e disposição de esgoto (1997); Diretrizes da OMS para reutilização de água de reuso na agricultura (2006) e Bahia (Resolução CONERH N° 75).

(Legislação com limite intermediário): Diretriz Técnica da Arábia Saudita para Uso de Águas Residuais Tratadas na Irrigação (2006).
(Legislações com limites mais restritivos): São Paulo (Lei SES/SIMA N° 01), Ceará (Resolução COEMA N° 2) e a Diretriz americana EPA (2012).

O termo "coliformes totais" abrange tanto os coliformes tradicionais, como *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia* e *Klebsiella*, quanto outras espécies recentemente incluídas com base em testes de DNA da família Enterobacteriaceae (APHA, 2023). A presença de coliformes totais pode ser um indicativo de contaminação por matéria orgânica ou fecal, além de sugerir a possível presença de patógenos prejudiciais à saúde humana (APHA, 2023). Contudo, sua eficácia como parâmetro regulatório é limitada, já que não fornece informações tão precisas sobre contaminação fecal quanto os coliformes termotolerantes ou *E. coli*, que são mais diretamente relacionados à presença de patógenos fecais de maior interesse para a saúde pública (APHA, 2023). A análise de coliformes totais tem sido amplamente utilizada ao longo do tempo como um indicador de saneamento inadequado, presença de contaminação fecal e bactérias patogênicas e oportunistas, porém, devido à sua abrangência, tem sido gradualmente substituída por indicadores mais específicos em algumas legislações (APHA, 2023).
O limite máximo de detecção de coliformes totais (>16.000 NMP/100mL) foi registrado em duas amostras de ET e uma do EF, dificultando a avaliação da eficiência da coluna em fevereiro/2024. As médias foram de 9420 ± 5264 NMP/100mL no ET, 4216 ± 4713 NMP/100mL no EF e 25 ± 21 NMP/100mL no EP, que alcançaram uma redução de 99,67% em relação ao ET. Nenhuma amostra de ET esteve abaixo do limite de 400 NMP/100mL adotado pela autoridade ambiental do Kuwait (2001), enquanto para o EF foram registradas apenas duas amostras dentro do limite deste padrão. Todas as amostras do EP atenderam a esse limite, evidenciando a alta eficiência do sistema de polimento (Figura 6).

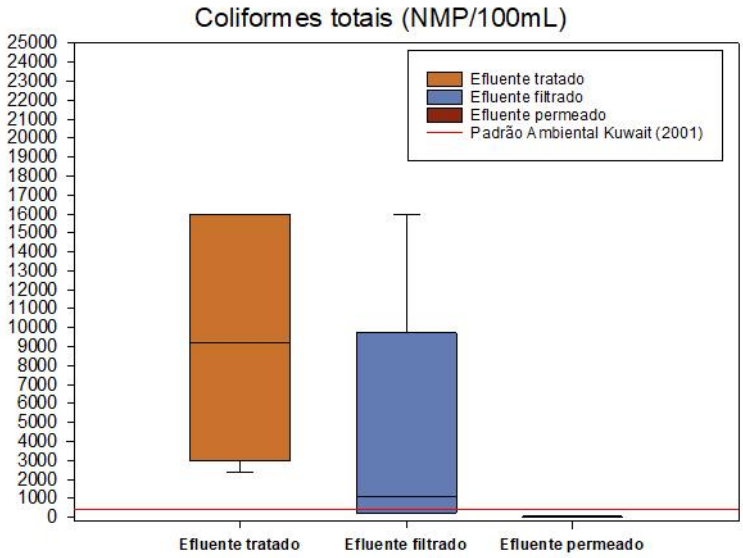

Figura 6 – Box Plot do parâmetro Coliformes totais por ponto de análise

Os resultados apresentados pelo trabalho de pesquisa referentes à presença de *E. coli* demonstraram uma redução significativa pelas etapas do sistema de polimento, similar ao que foi observado para coliformes totais e termotolerantes.
Para análise de *E.coli*, o limite mínimo de detecção foi de 1,8 NMP/100mL, valor registrado no EP em quase todas as amostras e no ET apenas em abril/2024. As médias foram de 1918,4 ± 2912,6 NMP/100mL no ET, 147,1 ± 174,3 NMP/100mL no EF e 1,8 ± 0,06 NMP/100mL no EP. A coluna de adsorção reduziu o parâmetro do ET em 79,54%, enquanto o EP alcançou reduções de 95,35% no ET e 69,60% no EF.
Para este parâmetro, a avaliação foi realizada com base em um limite intermediário, conforme estabelecido pelo Regulamento K.D.269 (Chipre) e pela Comissão Europeia 2020/741 (UE), que determinam valores entre 10 e 5 NMP/100 mL. Também foram consideradas legislações mais restritivas, como a diretriz AGWR (Austrália, 2006) e a norma do estado de São Paulo, ambas exigindo a completa ausência do patógeno para fins de reúso irrestrito. Como referência de limite menos restritivo, adotou-se o valor de 100 NMP/100 mL, presente nos documentos normativos da França, da Espanha e da Jordânia (Figura 7).

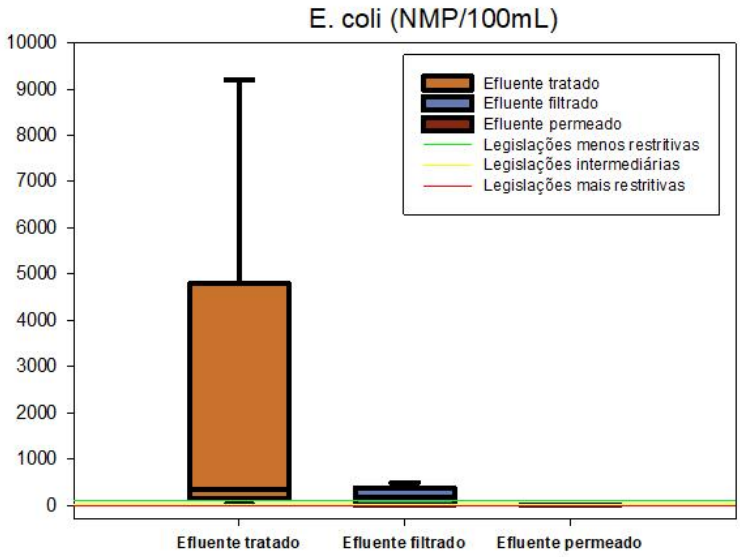

Figura 7 – Box Plot do parâmetro *E.coli* por ponto de análise

Nota: (Legislações com limites menos restritivos) Critérios franceses de reutilização de água para irrigação (1991), Decreto Real espanhol 1620 para a Reutilização de Águas Tratadas (2007) e Padrão jordaniano JS: 893 (2002).
(Legislação com limite intermediário): Regulamento Cipriano K.D.269 (2005) e no Regulamento da Comissão Europeia 2020/741 (UE).
(Legislações com limites mais restritivos): São Paulo (Lei SES/SIMA N° 01), e a Diretriz americana Australia AGWR (2006).

O gênero *Enterococcus* compreende bactérias Gram-positivas, com formato de cocos e que frequentemente se organizam em cadeias, predominantemente oriundas do trato intestinal, sendo mais de 50 espécies atualmente reconhecidas (APHA, 2023). Este grupo inclui diversas bactérias do gênero Streptococcus, como *Streptococcus faecalis* e *Streptococcus faecium*, que são componentes essenciais das comunidades intestinais de muitos animais, além de serem patógenos oportunistas responsáveis por milhões de infecções anualmente (APHA, 2023; BYAPPANAHALLI et al., 2012). O gênero *Enterococcus* é utilizado como indicador de poluição fecal em águas doces e marinhas devido à sua notável resistência e capacidade de tolerar diversas condições de crescimento (APHA, 2023; BYAPPANAHALLI et al., 2012). Essa adaptabilidade permite que algumas espécies persistam e se desenvolvam em ambientes naturais, sem necessariamente estarem ligadas à contaminação fecal (BYAPPANAHALLI et al., 2012).
Todas as amostras de *Enterococcus* spp. apresentaram valores abaixo do limite mínimo de detecção (<1 UFC/100mL). Apenas a diretriz da França (1991) exige uma redução logarítmica específica, estabelecendo um limite de 10 UFC/100mL após redução de 4 logs, também atendido pelo ET (Figura 8)

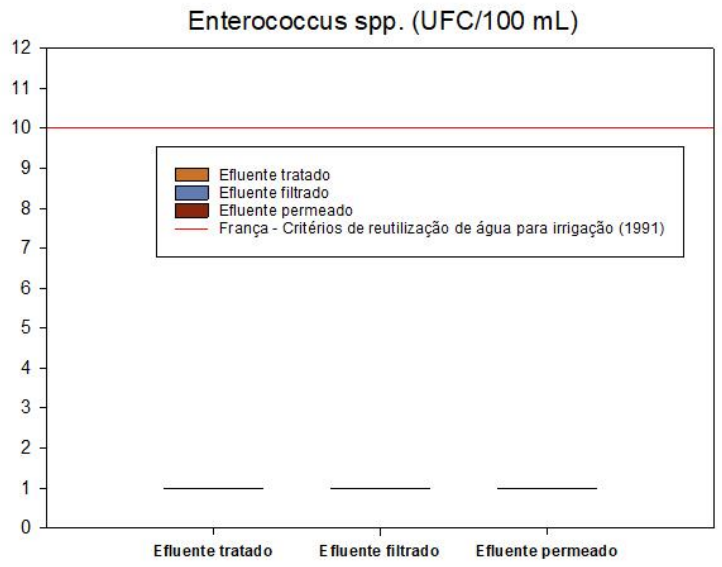

Figura 8 – Box Plot do parâmetro *Enterococcus* por ponto de análise

A análise de ovos e larvas viáveis de helmintos tem como objetivo detectar e quantificar o risco de infecção por esses organismos, distinguindo entre formas viáveis e não viáveis após o tratamento de águas residuais (APHA, 2023). Essa análise é crucial, pois algumas larvas e ovos demonstram resistência a tratamento com cloro, à luz ultravioleta (UV) e ao ozônio (DE VICTORICA; GALVÁN, 2003; LAZAROVA et al., 2013).

A persistência de ovos e larvas viáveis em sistemas de tratamento pode representar um risco significativo para a saúde pública, especialmente em países em desenvolvimento, onde a infecção por helmintos é mais prevalente (DE VICTORICA; GALVÁN, 2003). A capacidade dessas formas de vida de resistir a métodos de desinfecção tradicionais destaca a necessidade de métodos eficazes de monitoramento e tratamento para utilização segura na irrigação com água de reuso (LAZAROVA et al., 2013). As infecções por helmintos representam um dos maiores riscos e preocupações, uma vez que as doses infecciosas são extremamente baixas, variando de 1 a 10 ovos/L, em comparação com as exigências para bactérias (LAZAROVA et al., 2013). Essas infecções ocorrem principalmente por contato cutâneo e pelo consumo de alimentos crus (LAZAROVA et al., 2013). Além disso, nematoides como *Ascaris* spp., que é o helminto mais prevalente em águas residuais, não apenas resistem à cloração, mas também podem coexistir com patógenos entéricos humanos, dos quais se alimentam, permitindo sua proliferação (APHA, 2023 LAZAROVA et al., 2013).

Para ovos e larvas viáveis de helmintos, o menor valor no ET foi 0,20/L (janeiro/2024), enquanto o EP apresentou valores abaixo do limite de detecção (<0,1/L) em três amostras. As médias foram de 1,06 ± 0,58 ovos e larvas/L no ET e 0,28 ± 0,05 no EP, com remoção média de 63,01% e máxima de 96% (abril/2024). Devido às doses de ovos de helmintos com potencial infeccioso serem bastante baixas, as legislações referentes a esse parâmetro apresentam valores bastante restritivos. Normas como a ISO 16075 (2020) e a diretriz da FAO (1973) adotados como limite menos restritivo estabelecem um limite de 1 ovo e larva/L, enquanto regulamentações mais rigorosas, como a Resolução COEMA nº 2 (Ceará, 2017), o Regulamento K.D.269 (Chipre, 2005) e as Normas de Qualidade para Água de Irrigação nº 1276-01 (Marrocos, 2002), exigem ausência total.

Em relação aos limites das legislações menos restritivas, apenas a amostra de abril/24 do ET ultrapassou esses limites. Destaca-se também a amostra de junho/26 do ET, que apresentou 1,0 ovo e larva viável/L de helminto, encontrando-se, portanto, no limite da legislação.

Por outro lado, em relação aos limites das normativas mais restritiva adotadas, o ET não atendeu em nenhuma das cinco amostras analisadas.

No caso do EP, não houve teve nenhuma amostra que excedeu o limite menos restritivo, além de apresentar 3 das 5 amostras dentro do limite das legislações mais restritivas se tomar como base os valores no limite mínimo de detecção do estudo (<0,1 ovo e larva viável/L) (Figura 9).

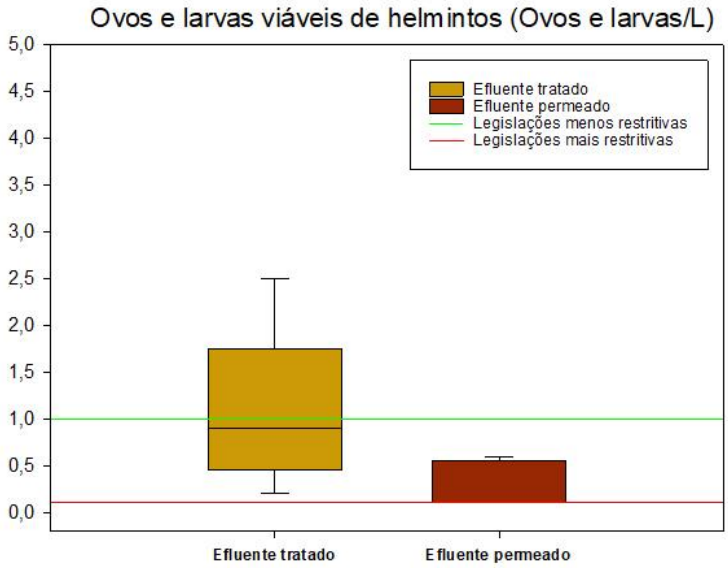

Figura 9 – Box Plot do parâmetro Ovos e larvas viáveis de helmintos por ponto de análise
Nota: (Legislações com limites menos restritivos) ISO 16075 (2020) e a diretriz da FAO (1973).
(Legislações com limites mais restritivos): Resolução do Ceará COEMA nº 2, o Regulamento Cipriano K.D.269 (2005) e as Normas marroquinas de Qualidade para Água de Irrigação nº 1276-01 (2002).

O gênero *Salmonella* é composto por sete grupos filogenéticos, frequentemente classificados em duas espécies: *Salmonella enterica* e *Salmonella bongori*, sendo que a maioria dos laboratórios apenas notifica o gênero e a quantidade (APHA, 2023). A análise de *Salmonella* spp. é de extrema importância, considerando que surtos de febre tifoide e salmonelose transmitidos pela água ainda são relatados em diversos países, especialmente em desenvolvimento (APHA, 2023). Apesar da ampla evidência da presença de Salmonella em água reutilizada, esse parâmetro não é exigido em várias legislações ao redor do mundo, incluindo as diretrizes da OMS, EPA e Padrão ISO 16075 (LI et al., 2014; LOPEZ-GALVEZ et al., 2014). Essa falta de exigência pode levar à subestimação da quantidade de *Salmonella* spp., uma bactéria de extremo interesse de saúde pública, que não é considerada como outras bactérias entéricas, como *E. coli*. Além disso, a *Salmonella* demonstra capacidade de sobrevivência a diferentes métodos de desinfecção, utilizando várias estratégias adaptativas (ZENG et al., 2013). A contaminação das águas de irrigação é uma via comum que contribui para a contaminação dos cultivos, sendo frequentemente associada a surtos de infecções por Salmonella (LEVANTESI et al., 2012; SANTIAGO et al., 2018).
No caso de *Salmonella* spp., todas as amostras do EP permaneceram abaixo do limite de detecção (<1,8 NMP/mL). Em contraste, o ET apresentou uma única amostra fora desse limite, registrada em maio/2024, com valor superior a 1600 NMP/mL, atingindo o limite máximo de detecção do laboratório externo. A média do ET foi de 321,44 ± 511,42 NMP/mL, enquanto o EP manteve valores consistentemente baixos (<1,8 NMP/mL), atingindo uma eficiência de 99,88% em maio/2024. O EP atendeu às exigências da Norma n° 1276-01 (2002) do Marrocos, que demanda a ausência de *Salmonella spp*. para irrigação irrestrita com água de reuso (Figura 10).

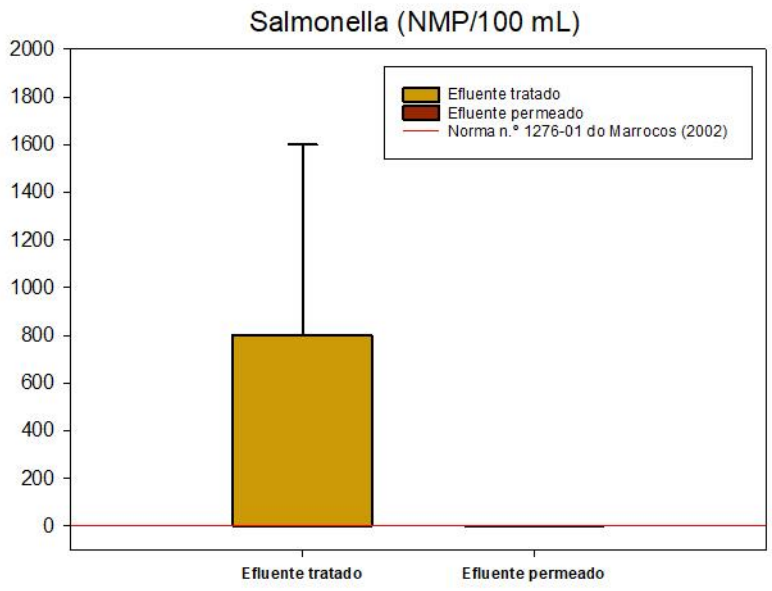

Figura 10 – Box Plot do parâmetro *Salmonella* por ponto de análise

O ET atingiu o limite normativo completamente apenas para *Enterococcus* spp., com ausência do patógeno em todas as amostras. No caso de Enterococcus spp., que não foi detectado nas amostras de ET, é possível que o gênero seja mais suscetível às condições impostas pelo sistema de tratamento disponível. Segundo Davies-Colley (1999), Enterococcus spp. é particularmente afetado por altos níveis de oxigenado dissolvido e exposição à radiação UV, que favorecem a foto-oxidação e causam a destruição de membranas celulares e danos ao DNA, reduzindo sua presença no efluente.

No entanto, como esperado, o sistema não alcançou padrões para reúso irrestrito na agricultura. Estudos sobre lagoas de maturação em ETEs indicam reduções de 3 a 6 logs na carga patogênica do efluente tratado (OLIVEIRA *et al.* 2005). Entretanto, os valores ainda permanecem elevados devido à alta carga de patógenos no afluente, atendendo, em geral, apenas aos padrões para uso restrito na irrigação, em função das limitações no processo de remoção (VERBYLA *et al.* 2015; JORDÃO e PESSÔA, 2014).

Apesar de atender uma redução média de 72% nos parâmetros microbiológicos do ET, a coluna de adsorção atendeu completamente apenas o limite normativo menos restritivo para análise de Coliformes Termotolerantes. Esse resultado pode ser atribuído à alta carga patogênica do efluente, uma vez que os picos nos valores do EF acompanharam as maiores concentrações do ET. Isso indica que a eficiência da coluna de adsorção tem limitações em cenários de carga elevada, especialmente para parâmetros microbiológicos mais restritivos, nos quais a alta concentração inicial impede a remoção completa dos patógenos.

Embora a coluna de adsorção demonstre uma boa capacidade de filtração, ela demonstrou ser insuficiente para atender aos padrões estabelecidos para reuso irrestrito seguro utilizando parâmetros microbiológicos.

O sistema composto por coluna de adsorção seguido de ultrafiltração obteve uma eficiência significativa ao reduzir mais de 95% do total de patógenos investigados, atuando como uma barreira física que retém células maiores, como as de *E. coli*, que têm dimensões entre 1,1 e 1,5 µm de largura e 2 a 6 µm de comprimento (GOSWAMI e PUGAZHENTHI, 2020; TORTORA *et al.* 2012). Esse bloqueio eficiente ocorre devido à dimensão dos poros de 20 nm, que impede a passagem de organismos maiores que essa faixa, proporcionando uma filtragem efetiva de várias partículas microbiológicas.

Entretanto, para atender a padrões mais restritivos, exige-se a ausência completa do patógeno. Diferente do que ocorreu com a *E. coli* que foi detectada em apenas uma amostra, com 2 NMP/L, ovos e larvas viáveis de helmintos foram detectados em duas amostras, com concentrações de 0,60 e 0,50 ovos/L, respectivamente.

Dessa forma, para atender a padrões mais restritivos, o sistema de membrana pode exigir complementação com outras etapas de tratamento, especialmente para remover completamente *E.coli* e helmintos.

Estudos de Gander et al. (2000) mostraram que, embora removam mais de 95% de coliformes, membranas de polipropileno podem não atender legislações mais restritivas sem um processo adicional de desinfecção. Goswami e Pugazhenthi (2020) também apontam que membranas de filtração requerem, em alguns casos, um pré-tratamento, como a floculação, para melhorar a remoção de células bacterianas e detritos, possibilitando alcançar resultados mais rigorosos na qualidade do efluente. Karim et al. (2008) complementam que a floculação,

especialmente com o uso de floculantes poliméricos, age por neutralização de carga e formação de pontes de polímeros, otimizando a retenção bacteriana e alcançando permeados com baixíssima contaminação residual.
Portanto, a passagem e polimento do ET pela coluna de adsorção seguida da membrana de ultrafiltração demonstrou não atender os critérios mais rigorosos de uso irrestrito da água de reúso, devido à presença de ovos e larvas viáveis de helmintos e *E. coli* em algumas amostras. Observou-se a necessidade de tratamento adicional para assegurar conformidade com esses padrões e portanto, apresentar maior segurança no emprego dessa água de reúso nos moldes preconizados.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

ET não atingiu a maioria dos padrões para reúso irrestrito na agricultura, devido às altas concentrações de patógenos no afluente e as limitações no processo de remoção do sistema de lagoas. Por outro lado, a ausência de *Enterococcus* spp. atende aos critérios para uso irrestrito, e evidencia a eficiência das lagoas no tratamento deste gênero, sensível a altos níveis de oxigênio dissolvido e à exposição à radiação UV.
Tendo reduzido em média 72% da concentração de patógenos investigados, a coluna de adsorção demonstrou-se, porém insuficiente para garantir qualidade microbiológica para reúso irrestrito. No entanto, pode se constituir em uma alternativa viável de polimento para usos agrícolas específicos e restritos, como no caso da fertirrigação empregada com água de reúso da ETE ACTION.
Coletado após a combinação da coluna de adsorção e da membrana de ultrafiltração, o EP demonstrou uma eficiência média superior a 95% na redução dos patógenos investigados, atendendo completamente aos limites de reúso irrestrito na irrigação para Coliformes termotolerantes, Coliformes totais e *Salmonella* spp., além de cumprir as exigências das normas menos restritivas em relação a ovos e larvas viáveis de helmintos e *E. coli*. No entanto, esse mesmo sistema não atendeu às normas mais restritivas, que exigem a ausência total de *E. coli* e ovos ou larvas viáveis de helmintos.
De uma maneira geral, o sistema de polimento avaliado demonstrou uma eficiência elevada na redução dos patógenos analisados. No entanto, para atender aos padrões mais rigorosos das legislações que exigem a ausência total de patógenos, seria necessário incorporar etapas complementares.
Dessa forma, para garantir maior qualidade sanitária e assegurar a conformidade com os padrões de reúso irrestrito, devem ser adotados ajustes operacionais no sistema de tratamento e polimento, como a inclusão de etapas adicionais, tal qual processos de coagulação-floculação e desinfecção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DA SILVA, Felipe Jonathan Areias et al. Reuso de efluentes para fertirrigação: estudo de caso da ete action, cachoeiras de Macacu, RJ. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, v. 16, n. 42, p. 276-299, 2023.

JONES, Edward R. et al. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, v. 13, n. 2, p. 237-254, 2021. https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021, 2021.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 7a ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2014.

LAZAROVA, Valentina; ASANO, Takashi. *Milestones in water reuse*. IWA publishing, 2013.

LIU, Xiao et al. Membrane technology for rainwater treatment and reuse: A mini review. *Water Cycle*, v. 2, p. 51-63, 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.08.001.

MANCUSO, P.C.S.; SANTOS H.F. (2003) *Reúso de Água*. Barueri: Manole.

MEKONNEN, Mesfin M.; HOEKSTRA, Arjen Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, v. 2, n. 2, p. e1500323, 2016. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500

OLIVEIRA, Sílvia; CORRÊA, M. A.; VON SPERLING, Marcos. Avaliação de 166 ETES em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: influência de fatores de projeto e operação. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, p. 358-368, 2005.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Declaração universal dos direitos da água*. ONU.1992.

SHOUSHTARIAN, Farshid; NEGAHBAN-AZAR, Masoud. Worldwide regulations and guidelines for agricultural water reuse: a critical review. *Water*, v. 12, n. 4, p. 971, 2020. https://doi.org/10.3390/w12040971.

ALMEIDA, Jaqueline Costa Areas de. Tratamento sequencial de águas pluviais com coluna de adsorção e membrana de ultrafiltração para uso em edificações. 2022. 127f. TCC (Graduação) - Curso Engenharia Ambiental e Sanitária, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

ANGELAKIS, Andreas N. et al. Water reuse: from ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science*, v. 6, p. 26, 2018. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026

APHA. 2023. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24th ed. Washington DC: APHA Press; 2023.

AUSTRALIA. *AUSTRALIAN GUIDELINES FOR WATER RECYCLING (AGWR*).2008. ISBN 192117319X. Disponível em: https://www.nhmrc.gov.au/about- us/publications/australian-guidelines-water-recycling. Acesso em: 21 mar. 2024.

BYAPPANAHALLI, Muruleedhara N. et al. Enterococci in the environment. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v. 76, n. 4, p. 685-706, 2012.

CARVALHO, Miguel Angelo Alvarenga de. Potencialidade do emprego da água de reúso para fertirrigação: o estudo de caso da ETE ACTION em Cachoeiras de Macacu/RJ, associada a um sistema de polimento por membrana em escala de laboratório. 2023. 131f. Projeto final (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

CEARÁ. *RESOLUÇÃO COEMA No 2 de 02 de fevereiro de 2017*. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, no Estado do Ceará. Diário Oficial de CE em 02 fev. 2017.

CESCON, Anna; JIANG, Jia-Qian. Filtration process and alternative filter media material in water treatment. *Water*, v. 12, n. 12, p. 3377, 2020. http://dx.doi.org/10.3390/w12123377.

CHEN, Feng et al. Distribution and accumulation of endocrine-disrupting chemicals and pharmaceuticals in wastewater irrigated soils in Hebei, China. *Environmental Pollution*, v. 159, n. 6, p. 1490-1498, 2011.

CONTRERAS, Jesse D. et al. Health risks from exposure to untreated wastewater used for irrigation in the Mezquital Valley, Mexico: A 25-year update. *Water Research*, v. 123, p. 834-850,2017.doi:10.1016/j.watres.2017.06.058

DA SILVA, Felipe Jonathan Areias et al. Reuso de efluentes para fertirrigação: estudo de caso da ete action, cachoeiras de Macacu, RJ. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, v. 16, n. 42, p. 276-299, 2023.

DAVIES-COLLEY, R. J. et al. Inactivation of faecal indicator micro-organisms in waste stabilisation ponds: interactions of environmental factors with sunlight. *Water research*, v. 33, n. 5, p. 1220-1230, 1999.

DE VICTORICA, Jorge; GALVÁN, Matilde. Preliminary testing of a rapid coupled methodology for quantitation/viability determination of helminth eggs in raw and treated wastewater. *Water research*, v. 37, n. 6, p. 1278-1287, 2003.

EU. *Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the council. 2022/C 298/01*. On minimum requirements for water reuse. Disponível em:https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.C_.2022.298.01.0001.01.ENG&toc=OJ%3AC%3A2022%3A298%3ATOC . Acesso em: 21 mar. 2024.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Wastewater quality guidelines for agricultural use*. FAO, 1999. Disponível em: https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e04.htm. Acesso em: 27 jan. 2024.

GANDER, M. A.; JEFFERSON, B.; JUDD, S. J. Membrane bioreactors for use in small wastewater treatment plants: membrane materials and effluent quality. *Water Science and Technology*, v. 41, n. 1, p. 205-211, 2000.

GIACCHINI, Margolaine. Uso e reuso da água. *Série de Cadernos Técnicos. CREA-PR*, 2011.
GÖNDER, Z. Beril; ARAYICI, Semiha; BARLAS, Hulusi. Advanced treatment of pulp and paper mill wastewater by nanofiltration process: Effects of operating conditions on membrane fouling. *Separation and purification technology*, v. 76, n. 3, p. 292-302, 2011. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.10.018

GOSWAMI, Kakali Priyam; PUGAZHENTHI, G. Credibility of polymeric and ceramic membrane filtration in the removal of bacteria and virus from water: A review. *Journal of environmental management*, v. 268, p. 110583, 2020.

GOVERNO DO ESTADO DA BAHIA. (2010) *RESOLUÇÃO CONERH No 75, de 29 de julho de 2010*. Diário Oficial do Estado.

HESPANHOL, Ivanildo. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. *Estudos avançados*, v. 22, p. 131-158, 2008..https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200009

INBAR, Yossi. New standards for treated wastewater reuse in Israel. In: *Wastewater reuse–Risk assessment, decision-making and environmental security*. Springer Netherlands, 2007. p. 291-296

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 16075-1: 2020 – Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects - Part 2: Development of the project. *International Organization for Standardization*, Geneva. 2020

JARAMILLO, María Fernanda; RESTREPO, Inés. Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability*, v. 9, n. 10, p. 1734, 2017. https://doi.org/10.3390/su9101734

JONES, Edward R. et al. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, v. 13, n. 2, p. 237-254, 2021. https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021, 2021.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 7ª ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2014.

KARIM, Muhammad Nazmul et al. Flocculation enhanced microfiltration of Escherichia coli lysate. *Biochemical engineering journal*, v. 40, n. 3, p. 512-519, 2008. https://doi. org/10.1016/j.bej.2008.02.006.

LAM, Steven et al. Evidence for public health risks of wastewater and excreta management practices in Southeast Asia: a scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 12, n. 10, p. 12863-12885, 2015.

LAVRADOR FILHO, José. Contribuição para o entendimento do reúso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil. 1987. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

LAZAROVA, Valentina; ASANO, Takashi. *Milestones in water reuse*. IWA publishing, 2013.

LEVANTESI, Caterina et al. Salmonella in surface and drinking water: occurrence and water-mediated transmission. *Food Research International*, v. 45, n. 2, p. 587-602, 2012.https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.037

LI, Dan et al. Quantification of viable bacteria in wastewater treatment plants by using propidium monoazide combined with quantitative PCR (PMA-qPCR). *Journal of Environmental Sciences*, v. 26, n. 2, p. 299-306, 2014.

LIBÂNIO, Marcelo. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água***.** 3. ed. Campinas:Editora Átomo, 2010. (ISBN 978-85-7670-165-1).

LOPEZ-GALVEZ, Francisco et al. Safety assessment of greenhouse hydroponic tomatoes irrigated with reclaimed and surface water. *International Journal of Food Microbiology*, v. 191, p. 97-102, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.09.004

MANCUSO, P.C.S.; SANTOS H.F. (2003) *Reúso de Água*. Barueri: Manole.

MEKONNEN, Mesfin M.; HOEKSTRA, Arjen Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, v. 2, n. 2, p. e1500323, 2016. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500

MINAS GERAIS. *DELIBERAÇÃO NORMATIVA CERH-MG No 65, de 18 de junho de 2020***.** Estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reuso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) de sistemas

MOSCOSO, Julio. Aspectos técnicos de la agricultura con aguas residuales. *Lima: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS). Organización panamericana de la salud (OPS)*, 1995.

OKOH, Anthony I.; SIBANDA, Thulani; GUSHA, Siyabulela S. Inadequately treated wastewater as a source of human enteric viruses in the environment. *International journal of environmental research and public health*, v. 7, n. 6, p. 2620-2637, 2010. https://doi.org/10.3390/ijerph7062620.

OLIVEIRA, Flávio Giro de. Análise da viabilidade de um sistema domiciliar de aproveitamento de águas pluviais na cidade do Rio de Janeiro. 2020. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

OLIVEIRA, Sílvia; CORRÊA, M. A.; VON SPERLING, Marcos. Avaliação de 166 ETES em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: influência de fatores de projeto e operação. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, p. 358-368, 2005.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Declaração universal dos direitos da água*. ONU.1992.

PIMENTEL, David; PIMENTEL, Marcia H. *Food, energy, and society*. CRC press, 2007.

PROSAB. Reúso das Águas de Esgoto Sanitário, Inclusive Desenvolvimento de Tecnologias de Tratamento para esse Fim**.** *ABES*, 2006. 427 p. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-deprogramas/prosab/Esgoto-Prosab Acesso em: 04 jul.2024.

ROLIM, Hosineide de Oliveira et al. Qualidade dos efluentes de sistemas de tratamento biológico UASB e UCT para reúso agrícola. 2016.

SANTIAGO, P. et al. High prevalence of Salmonella spp. in wastewater reused for irrigation assessed by molecular methods. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 221, n. 1, p. 95–101, jan. 2018b. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.10.007

SÃO PAULO. *RESOLUÇÃO CONJUNTA SES/SIMA No 01, de 13 de fevereiro de 2020*. Disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 14 fev 2020. Seção I, p. 47/48.

SCARPA, F. et al. Reuse of Water: Methods to diminish non-biodegradable organic compounds. *WWT Project Wort, KTH*, 2011.

SHOUSHTARIAN, Farshid; NEGAHBAN-AZAR, Masoud. Worldwide regulations and guidelines for agricultural water reuse: a critical review. *Water*, v. 12, n. 4, p. 971, 2020. https://doi.org/10.3390/w12040971.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, Christine L. Microbiologia. 10° ed. *Porto Alegre: Artmed*, 2012.

TRANG, Do Thuy et al. Incidence of and risk factors for skin ailments among farmers working with wastewater-fed agriculture in Hanoi, Vietnam. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, v. 101, n. 5, p. 502-510, 2007. https://doi.org/10.1016/j.trstmh.2006.10.005.

USEPA (US Environmental Protection Agency). *Guidelines for Water Reuse*. US Environmental Protection Agency: Anchorage, AK, USA, 2012.

VERBYLA, Matthew E. et al. Emerging challenges for pathogen control and resource recovery in natural wastewater treatment systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 2, n. 6, p. 701-714, 2015. https://doi.org/10.1002/wat2.1101.

VESTERGAARD. *Manual do usuário*. Purificador de água para uso comunitário. LifeStraw Community, 2014.

VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto*. 4a.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

WHO. *Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management*. Geneva, 2016. 204p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *WHO guidelines for the safe use of wasterwater excreta and greywater*. World Health Organization, 2006.

ZENG, Bin et al. Formation and resuscitation of viable but nonculturable Salmonella typhi. *BioMed research international*, v. 2013, n. 1,