

## Wetlands construídos e segurança hídrica: revisão da eficiência na remoção de contaminantes em efluentes têxteis para reúso

### Constructed Wetlands and Water Security: A Review of Contaminant Removal Efficiency in Textile Effluents for Reuse

<sup>1</sup>Cleiton Campos da Silva, <sup>2</sup>José Augusto Alves Pimenta, <sup>3</sup>Cláudia Telles Benatti

<sup>1</sup>Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PEU-UEM) – Universidade Estadual de Maringá (eng.cleitoncampos@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá (jaapimenta@uem.br)

<sup>3</sup>Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil – Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PEU-UEM) – Universidade Estadual de Maringá (ctbenatti@uem.br)

**RESUMO:** O reúso de efluentes tratados constitui uma estratégia essencial para fortalecer a segurança hídrica e reduzir a pressão sobre os mananciais, especialmente em setores de alta intensidade hídrica como o têxtil. Este estudo revisou sistematicamente a eficiência dos wetlands construídos (WCs) na remoção de contaminantes presentes em efluentes têxteis e suas implicações para o reúso seguro da água. A revisão foi conduzida seguindo as diretrizes PRISMA, com buscas nas bases Google Acadêmico, ScienceDirect e Capes Periódicos. Foram identificados 3.424 artigos, dos quais 55 atenderam a todos os critérios de elegibilidade e foram incluídos na síntese qualitativa. Os resultados demonstram que os WCs, em configurações de fluxo vertical, horizontal e híbrida, alcançam eficiências médias superiores a 80% na remoção de DBO, DQO e cor aparente, podendo atingir valores acima de 95% quando combinados a sistemas complementares. Além disso, reduzem metais pesados e micropoluentes, possibilitando o reúso não potável conforme os limites da ABNT NBR 16783:2019 e da Resolução CONAMA 430/2011. A análise demonstra que os WCs constituem tecnologia sustentável, de baixo custo e elevada robustez operacional, com potencial de ampliar a disponibilidade de água de reúso e contribuir para a segurança hídrica em contextos urbanos e industriais.

**Palavras-Chave:** Wetlands Construídos. Efluentes Têxteis. Reúso de Água. Segurança Hídrica. Eficiência de Remoção.

**ABSTRACT:** The reuse of treated effluents is an essential strategy to strengthen water security and reduce pressure on freshwater sources, particularly in water-intensive sectors such as textiles. This study systematically reviewed the efficiency of constructed wetlands (CWs) in removing contaminants from textile effluents and assessed their implications for safe water reuse. The review followed PRISMA guidelines, with searches conducted in Google Scholar, ScienceDirect, and the Capes Periodicals portal. A total of 3,424 records were identified, of which 55 met all eligibility criteria and were included in the qualitative synthesis. The findings show that CWs configured as vertical, horizontal, and hybrid flow systems achieve average removal efficiencies above 80% for BOD, COD, and apparent color, and can exceed 95% when coupled with complementary treatment processes. In addition, CWs reduce heavy metals and micropollutants, enabling non-potable reuse in accordance with ABNT NBR 16783:2019 and CONAMA Resolution 430/2011. Overall, the analysis indicates that CWs constitute a sustainable, low-cost, and operationally robust technology with strong potential to expand the availability of reclaimed water and to contribute to water security in urban and industrial settings.

**Keywords:** Constructed Wetlands. Textile Effluents. Water Reuse. Water Security. Removal Efficiency.

Recebido em:  
25/11/2025  
Revisado em:  
14/04/2026  
Publicado em:  
27/04/2026

## 1. INTRODUÇÃO

A segurança hídrica constitui, atualmente, um conceito central na gestão sustentável dos recursos hídricos, englobando não apenas a disponibilidade, mas também a acessibilidade e a qualidade da água necessária para atender às demandas humanas, ecológicas e econômicas (Mishra et al., 2021).

Entretanto, a poluição hídrica permanece como um dos maiores desafios para sua consolidação. Efluentes provenientes da agricultura, da indústria, de aterros sanitários e de sistemas de esgoto são frequentemente lançados diretamente nos corpos aquáticos, modificando suas propriedades naturais e comprometendo a integridade dos ecossistemas (Muduli et al., 2022a).

Entre os setores industriais com maior impacto, destaca-se a indústria têxtil, notória pelo elevado consumo de água nos processos úmidos, especialmente no tingimento, e pela expressiva liberação de corantes nos efluentes. Esses compostos apresentam toxicidade elevada, coloração persistente e baixa biodegradabilidade, fatores que reduzem a penetração de luz, prejudicam a fotossíntese e afetam o equilíbrio ecológico (Yanto e Tachibana, 2014; Kumar e Gunasundari, 2017). Além disso, os efluentes têxteis frequentemente contêm metais pesados, o que aumenta sua toxicidade final (Chandanshive et al., 2017). Os corantes azóicos, amplamente utilizados no setor, possuem grupos azo ligados a anéis aromáticos, conferindo-lhes potencial mutagênico e/ou carcinogênico, e contribuindo para o aumento das concentrações de carbono orgânico total, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) (Saratale et al., 2011; Popli e Patel, 2014; Almeida et al., 2019).

No Brasil, a Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece que os efluentes provenientes de qualquer fonte poluidora somente podem ser lançados em corpos receptores se estiverem em conformidade com os padrões e condições regulamentares. Mais recentemente, a ABNT NBR 16783:2019 estabeleceu diretrizes específicas para o uso seguro de águas de reúso em diferentes contextos.

Nesse contexto, o reúso de águas residuais constitui uma estratégia promissora para fortalecer a segurança hídrica e, simultaneamente, promover a sustentabilidade ambiental. Além de reduzir a pressão sobre os mananciais, soluções descentralizadas de tratamento possibilitam a utilização segura da água tratada em atividades não potáveis, como irrigação, lavagem de pátios e veículos e uso em descargas sanitárias (Nazir et al., 2025). No entanto, a ampliação dessas práticas depende não apenas da inovação tecnológica, mas também da superação de barreiras regulatórias, culturais e de aceitação social (Peiris et al., 2023).

Entre as diversas tecnologias disponíveis, destacam-se as Soluções Baseadas na Natureza (SBN), como os wetlands construídos (WCs), que têm atraído crescente atenção. Esses sistemas simulam processos naturais de autodepuração em ambientes aquáticos e integram mecanismos físicos, químicos e biológicos, configurando-se como alternativa sustentável, de baixo custo e elevada eficiência (Hassan et al., 2021; Kiflay et al., 2021).

Diversos estudos confirmam a eficácia dos WCs na remoção de contaminantes provenientes da indústria têxtil. Chandanshive et al. (2017) relataram reduções significativas de cor e de metais pesados (como arsênio, cádmio e cromo) em sistemas de wetlands construídos de fluxo vertical (WCFV) povoados com *Typha angustifolia* e *Paspalum scrobiculatum*. De forma semelhante, Shehzadi et al. (2014) observaram que sistemas de WCFV povoados com *Typha domingensis*, especialmente quando associados a bactérias endofíticas, alcançaram reduções expressivas de DBO, DQO e cor aparente.

Estudos recentes também têm reforçado o potencial dos WCs no tratamento de efluentes têxteis, com redução expressiva de parâmetros físico-químicos e diminuição de efeitos tóxicos associados ao efluente tratado. Esses achados ampliam a relevância da tecnologia não apenas

sob a perspectiva do tratamento, mas também quanto às suas implicações para o reúso e para a segurança hídrica (Silva et al., 2025).

Apesar dos avanços, observa-se que ainda há poucas revisões sistemáticas focadas especificamente no desempenho de WCs aplicados a efluentes têxteis, com ênfase simultânea em eficiência, reúso e segurança hídrica, o que justifica a presente revisão. Assim, este trabalho tem como objetivo identificar, selecionar e analisar criticamente estudos que avaliam a aplicação dessa tecnologia no tratamento de efluentes têxteis, considerando sua eficiência na remoção de contaminantes e as implicações para o reúso e a segurança hídrica. Os principais estudos recentes relacionados a essa temática encontram-se sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Estudos recentes sobre WCs aplicados ao tratamento de efluentes têxteis

<b>País</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Tipo de Wetland</b>	<b>Eficiência de remoção (%)</b>	<b>Aplicabilidade</b>	<b>Referências</b>
Brasil	Efluente têxtil real;	WCs de Fluxo Subsuperficial Vertical (WCFSSV)	DBO: 99,3% / DQO: 95,5% / Cor: ~99%	Redução de citotoxicidade e genotoxicidade em peixes	Silva et al., (2025)
Paquistão	Efluente têxtil	WCs de Fluxo Superficial Vertical (WCFSV); diferentes plantas	Até ~ 63,6 % remoção de Sólidos Suspensos Totais (SST), ~ 57,9 % de DBO; metais como Cd e Cr com ~ 75,2 % e ~ 70,5 % respectivamente	Otimização de parâmetros	Javeed et al., (2025)
Índia	Efluente têxtil	WCs contendo Biochar (WCB) e sistemas convencionais de WCs de Fluxo Subsuperficial Vertical (WCFSSV)	Cor: até 96% DQO: 92–94% DBO: 90% SST 88% Nitrogênio total: 70–80%	A eficiência de redução de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) foi de 53,07% no WCB e 40,04% no WCFSSV. A remoção de metais pesados foi superior no WCB, alcançando 100% em 3 a 12 horas, enquanto o WCFSSV apresentou 82% (Cr) a 93% (Cu) em um período de 6 a 24 horas	Selvakumar et al., (2023)
Índia (colaboração com Coreia)	Efluente têxtil real	WCs com consórcio de plantas	DQO 87%, DBO 86%, Cor 75%, SST 49%, SDT 46%	abatimento de carga orgânica e cor	Kadam et al., (2022)

Índia	Efluente sintético de tingimento	WCs híbrido: WCs de Fluxo Horizontal (WCFH) + WCs de Fluxo Subsuperficial Vertical (WCFSSV)	Cor 90% (WCFH); NH <sub>4</sub> -N 69%, N orgânico 39% (WCFSSV).	Redução Cor, NH <sub>4</sub> -N, N orgânico	Benny e Chakraborty (2023)
Índia	Efluente têxtil real	WCs de Fluxo Vertical (WCFV)	DQO 83%, Cor 90%, SDT 84%	Tratamento e geração bioelétrica	Sonu et al., (2021)
Índia	Efluente têxtil real	WCs de Fluxo Subsuperficial Horizontal (WCFSSH) com bioaumentação	Antes da bioaumentação: ≈ 62% DQO e ≈ 90% ADMI (cor); depois da bioaumentação: ≈ 74,10% DQO e ≈ 97,32% ADMI	DQO e cor (ADMI) removidos, aplicação piloto	Patel et al., (2021)
Etiópia	Efluente têxtil	WCs de Fluxo Subsuperficial Vertical (WCFSSV)	Eficiência de remoção de cor: 84% no sistema plantado com Vetiver; 80% no sistema não plantado	Remoção cor	Etana et al., (2025)
Índia	Efluente real da indústria têxtil	WCs híbrido: WCs de Fluxo Subsuperficial Horizontal (WCFSSH) + WCs de Fluxo Subsuperficial Vertical (WCFSSV)	DQO: até 84% DBO: até 66% Cor: até 70% SST: até 93% Nitrogênio total: até 52%	Projeto de ETE sustentável para indústria têxtil em Haryana, Índia	Shenoy et al., (2022)
Índia	Efluente têxtil	WCs híbrido: WCs de Fluxo Subsuperficial Horizontal (WCFSSH) + WCs de Fluxo Subsuperficial Vertical (WCFSSV)	DQO e Cor > 90%	WC acoplado à célula de combustível microbiana (CWMFC) para o tratamento de efluente têxtil contendo corantes azo e geração simultânea de bioeletricidade	Kundu et al., (2025)

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta revisão foi conduzida conforme as diretrizes PRISMA (‘Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses’), em alinhamento com as recomendações de Moher et al. (2009).

Para identificar artigos elegíveis, realizamos uma busca bibliográfica abrangente utilizando as plataformas Google Acadêmico, o Capes Periódicos e a base ScienceDirect, cobrindo o intervalo temporal de 2010 a 2025. Além disso, incluímos inspeção manual das referências dos estudos selecionados, como recomendado pelo protocolo PRISMA, para mitigar perdas de estudos relevantes.

## 2.1. Estratégias de Busca

A questão que orientou a revisão foi: “Qual é a eficiência dos WCs na remoção de contaminantes presentes em efluentes têxteis, e quais são as implicações desses resultados para o reúso de água e para a segurança hídrica?”.

Para responder à pergunta norteadora, foram utilizadas estratégias de busca em português e inglês, com o objetivo de ampliar a recuperação de estudos relevantes publicados em diferentes contextos geográficos e indexados nas bases selecionadas. As buscas foram estruturadas de forma equivalente nos dois idiomas, respeitando a lógica temática da revisão e as particularidades de indexação de cada plataforma.

Em português, os principais descritores utilizados foram: wetlands construídos, efluentes têxteis, reúso de água, segurança hídrica e remoção de corantes.

Em inglês, foram empregados descritores semanticamente correspondentes, tais como: constructed wetlands, textile effluents, textile wastewater, water reuse, reclaimed water, water security, dye removal e color removal.

As combinações de palavras-chave foram estruturadas com os operadores booleanos AND e OR, contemplando os três eixos principais do estudo: (i) a tecnologia empregada, (ii) o tipo de efluente e (iii) o contexto de aplicação.

Como exemplo, em português foi utilizada a seguinte estratégia de busca: ("wetlands construídos" OR "wetland construído") AND ("efluente têxtil" OR "efluentes têxteis") AND ("reúso de água") AND ("segurança hídrica") AND ("remoção de corantes" OR "remoção de cor").

Em inglês, foi adotada estratégia equivalente, conforme o seguinte exemplo: ("constructed wetlands") AND ("textile wastewater" OR "textile effluents") AND ("water reuse" OR "reclaimed water") AND ("water security") AND ("dye removal" OR "color removal").

Adicionalmente, foram construídas combinações avançadas de descritores, incluindo sinônimos e variações ortográficas, conforme recomendado em revisões sistemáticas, visando reduzir perdas de estudos potencialmente elegíveis. Em razão das limitações operacionais da base ScienceDirect, também foi utilizada uma versão enxuta da string de busca, com menor número de operadores booleanos, a saber: "constructed wetlands" AND "textile wastewater" AND "water reuse" AND "water security".

Essa estratégia permitiu rastrear estudos com maior sensibilidade e especificidade, assegurando maior abrangência à busca bibliográfica e maior transparência metodológica ao processo de seleção.

## 2.2. Critérios de Inclusão e Exclusão

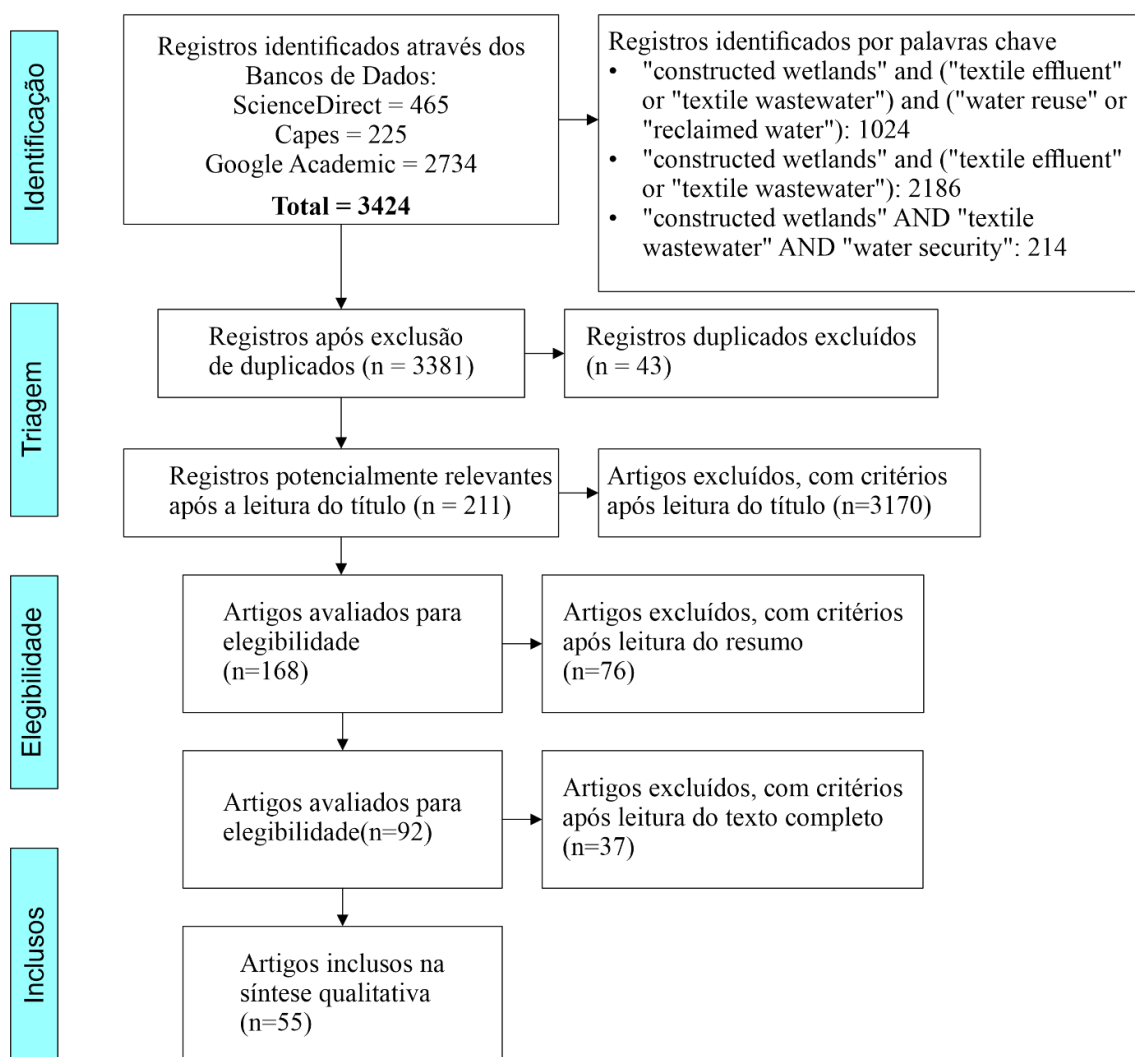
Foram considerados elegíveis estudos que investigassem o tratamento de efluentes têxteis por WCs, em escala laboratorial, piloto ou real, desde que apresentassem dados quantitativos de remoção de contaminantes, como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), cor aparente, corantes, metais pesados ou contaminantes emergentes. Também foram incluídos estudos que relacionassem esses resultados ao potencial de reúso da água tratada ou às suas implicações para a segurança hídrica.

Foram excluídos estudos que não abordassem especificamente efluentes têxteis, bem como aqueles em que os WCs não constituíssem a tecnologia central de tratamento. Também foram excluídos artigos sem dados quantitativos de remoção, revisões narrativas, dissertações, teses, capítulos de livro, relatórios técnicos, resumos de conferência, registros duplicados, trabalhos sem acesso ao texto completo e publicações fora do recorte temporal estabelecido (2010 a 2025).

### 2.3. Triagem

O processo de triagem foi conduzido em etapas sucessivas, conforme as recomendações do protocolo PRISMA. Após a identificação dos registros nas bases selecionadas, realizou-se a remoção de duplicados. Os estudos remanescentes foram então submetidos à leitura de títulos e resumos, a fim de verificar sua aderência inicial ao tema da revisão. Na sequência, os registros potencialmente relevantes foram avaliados quanto à elegibilidade em texto completo, com base nos critérios metodológicos e temáticos previamente definidos. Apenas os estudos que atenderam integralmente a esses critérios foram incluídos na síntese qualitativa final. O detalhamento desse processo de identificação, exclusão, elegibilidade e inclusão encontra-se apresentado no fluxograma PRISMA (Figura 1).

Figura 1. Resultados do Fluxograma do Prisma



Fonte: Adaptado de Moher et al. (2009)

### 3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

A discussão foi organizada, com base nos estudos incluídos na síntese qualitativa, em quatro eixos temáticos complementares: segurança hídrica e impacto da indústria têxtil, tecnologias convencionais de tratamento e seus desafios, fundamentos, tipologias e mecanismos de remoção dos WCs e evidências recentes da aplicação desses sistemas no tratamento de efluentes têxteis e suas perspectivas de reúso.

A síntese qualitativa final foi composta por 55 estudos, após as etapas de identificação, triagem e elegibilidade descritas no fluxograma PRISMA (Figura 1). De modo geral, os estudos analisados concentraram-se em países com forte atividade têxtil, como Bangladesh, Índia, China e Brasil, o que reforça a relevância ambiental, econômica e geográfica do tema nesses contextos. Também se observou heterogeneidade metodológica entre os estudos, especialmente quanto às características do afluente, às espécies vegetais empregadas e aos parâmetros construtivos e operacionais, o que limita comparações diretas mais robustas.

#### 3.1. Segurança hídrica: Contexto global do consumo de água e impacto da indústria têxtil

A segurança hídrica envolve garantir disponibilidade, qualidade e acesso à água para usos humanos, ecossistêmicos e produtivos, condição que se torna particularmente desafiadora diante da intensidade de consumo de água e do perfil poluente da cadeia têxtil. Estimativas indicam que a produção têxtil, incluindo o cultivo de fibras como o algodão, consome cerca de 93 bilhões de m<sup>3</sup> de água por ano, o que corresponde a aproximadamente 4% da retirada global de água doce. Em várias regiões produtoras, esse consumo ocorre justamente onde a escassez hídrica já é elevada, intensificando conflitos de uso, pressões sobre mananciais e vulnerabilidades socioambientais (Healthy Materials Lab, 2024; STWI, 2024).

Nos processos fabris, os chamados processos úmidos, tingimento, lavagem, estamparia e acabamento, respondem pela maior fração do consumo de água da cadeia têxtil. Estudos recentes apontam que essas etapas concentram aproximadamente 70-72% da água utilizada na manufatura têxtil, além de estarem associadas ao maior uso de insumos químicos e à geração de efluentes com alta carga orgânica, elevada coloração e presença de compostos tóxicos e recalcitrantes, os quais exigem tratamento adequado para evitar impactos ambientais significativos e persistentes (Kärkkäinen et al., 2024; Li et al., 2023).

O perfil dos efluentes têxteis é crítico, pois apresenta corantes sintéticos recalcitrantes, elevada carga orgânica (DQO/DBO), surfactantes, sais, metais e subprodutos de reações químicas pouco biodegradáveis. Revisões destacam a presença de corantes não biodegradáveis e compostos tóxicos que conferem coloração persistente, aumentam a demanda de oxigênio dissolvido e reduzem a penetração de luz nos corpos hídricos, afetando a fotossíntese e as cadeias tróficas e a produtividade primária (Castillo-Suárez et al., 2023; Halepoto et al., 2022; Silva et al., 2025).

Em países produtores, levantamentos de campo mostram volumes significativos de água e efluente por quilograma de tecido, variando segundo o tipo de malha, tecnologia empregada e práticas operacionais. Em fábricas de Bangladesh, estimou-se consumo de 164L de água subterrânea/kg de tecido e geração de 119L/kg de efluente apenas no setor de tingimento, revelando o potencial de ganho com medidas de eficiência hídrica e reúso interno (Uddin et al., 2023).

Do ponto de vista da gestão e governança, reduzir a pegada hídrica do setor demanda ações combinadas: (i) prevenção na fonte, como uso de corantes de maior fixação e processos menos intensivos em água; (ii) tratamento avançado de efluentes, incluindo métodos físico-químicos, biológicos, membranas e oxidações avançadas; e (iii) reúso seguro em processos compatíveis. Relatórios recentes reforçam a necessidade de padronização de desempenho e monitoramento das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) têxteis para atender metas de

circularidade e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6 e 12) (Peiris et al., 2023; Kärkkäinen et al., 2024).

Em síntese, a indústria têxtil representa um nó crítico da segurança hídrica: elevado consumo de água em etapas úmidas, à complexidade de composição dos efluentes gerados e à sua distribuição geográfica predominante em regiões sob estresse hídrico. Assim, a combinação de eficiência de processo, tratamento robusto e reúso de efluentes emerge como essencial para reduzir impactos, preservar recursos hídricos e alinhar o setor às metas de sustentabilidade globais (Healthy Materials Lab, 2024; Uddin et al., 2023; Castillo-Suárez et al., 2023).

### 3.2. Tecnologias de tratamento convencionais e seus desafios

Os efluentes têxteis podem ser tratados por processos físicos, químicos e biológicos. Os principais processos físicos são: sedimentação, decantação, adsorção, coagulação, floculação e filtração. Entretanto, esses processos podem apresentar algumas desvantagens. Nos processos que empregam coagulação/floculação, há geração de grande quantidade de lodo com elevadas concentrações de compostos potencialmente tóxicos (Zanoni e Yamanaka, 2016). Já na adsorção, comumente realizada com carvão ativado, o alto custo operacional constitui uma limitação (Saggiaro, 2014). Contudo, uma das principais vantagens da adsorção consiste na remoção integral dos contaminantes, sem a formação de subprodutos tóxicos (Dilarri et al., 2016).

A filtração através de membranas é uma tecnologia amplamente utilizada para concentrar, purificar e aumentar a qualidade do efluente tratado (Zanoni e Yamanaka, 2016). Entretanto, seu alto custo de implantação e operação, aliado ao fato de que o processo não reduz de forma eficaz o teor de sólidos dissolvidos, pode tornar o reúso direto da água inviável em determinados contextos.

Entre os processos químicos, destacam-se os processos oxidativos, amplamente empregados para a descoloração e quebra de estruturas cromóforas devido à simplicidade de aplicação. Os agentes oxidantes mais empregados incluem o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), hipoclorito de sódio ( $NaClO$ ) e o ozônio ( $O_3$ ). Existem ainda os processos oxidativos avançados (POAs), que são muito eficientes devido ao alto potencial oxidante dos radicais hidroxil ( $\bullet OH$ ), contudo, ainda pode ser considerado um sistema com alto custo de implantação e operação (Saratale et al., 2011).

Os efluentes têxteis também podem ser tratados pelos processos biológicos, com a aplicação de microrganismos, onde a degradação dos corantes pode ocorrer por biossorção ou degradação enzimática, ou ainda pela combinação das duas formas (Solís et al., 2012).

### 3.3. Wetlands construídos: fundamentos, tipologias e mecanismos de remoção

Os sistemas de WCs podem ser classificados em três categorias principais: wetlands de fluxo superficial (WCFSS), wetlands de fluxo subsuperficial (WCFSSH) e sistemas híbridos. Entre estes, os WCFSSH ainda se subdividem em horizontais (WCFSSH) e verticais (WCFSSHV), cada um apresentando particularidades estruturais, hidráulicas, bioquímicas e funcionais que influenciam sua eficiência no tratamento de efluentes (Stefanakis et al., 2014; Wu et al., 2014; Wang et al., 2018).

Além dessas diferenças gerais, destaca-se que parâmetros como geometria do leito, granulometria do meio-suporte, gradientes redox e padrões de distribuição de fluxo exercem influência direta sobre o desempenho global, reforçando a necessidade de especificações claras na literatura (Wu et al., 2014; Stefanakis et al., 2014).

O modelo WCFSS caracteriza-se pelo fluxo de efluente sobre a superfície do leito, em contato direto com caules e folhas das macrófitas. Sua principal vantagem é a elevada oxigenação natural, decorrente da exposição ao ar e à radiação ultravioleta, fator que também

contribui para a inativação de patógenos (Stefanakis et al., 2014). Além disso, podem abrigar uma ampla biodiversidade de insetos, moluscos e aves (IWA, 2012). Entretanto, sua desvantagem está na necessidade de extensas áreas para implantação, o que limita a aplicação em contextos que exigem reúso intensivo da água.

Já os WCFSS mantêm o fluxo abaixo da superfície do leito, geralmente constituído por cascalho e rochas porosas. Esse design reduz a exposição de humanos e animais a patógenos e promove a formação de biofilmes aderidos ao substrato e nas raízes das macrófitas, intensificando os processos de depuração biológica da matéria orgânica e outros poluentes (Hassan et al., 2021).

O WCFSSH opera com fluxo horizontal, permitindo que o efluente percorra gradualmente o leito por meio da declividade. Nesse sistema, a eficiência resulta da combinação de zonas aeróbias, anaeróbias e anóxicas, que favorecem processos físico-químicos e biológicos ao longo do percurso. Embora demande menor área que os WCFS, apresenta custo de implantação elevado e sensibilidade a variações na carga hidráulica, o que pode comprometer o desempenho sob condições variáveis (Sezerino et al., 2018).

O WCFSSV, por sua vez, foi introduzido por Seidel na década de 1960 e ganhou notoriedade por superar a deficiência dos sistemas horizontais quanto à nitrificação, uma vez que o fluxo intermitente de enchimento e drenagem aumenta a oxigenação e, conseqüentemente, a eficiência do tratamento (Li et al., 2015). Nesse modelo, o efluente é aplicado pela parte superior e coletado na parte inferior, enquanto as macrófitas, como *Typha spp.*, expandem seu sistema radicular nas camadas do leito. Graças a essa configuração, o WCFSSV é capaz de tratar altos volumes de água por área, sendo especialmente apropriado para a agroindústria, onde a demanda hídrica é elevada (Fan et al., 2012; Song et al., 2015). Embora demande menor área que os WCFS, seu custo de implantação tende a ser elevado (Sezerino et al., 2018).

### **3.4. Evidências recentes do tratamento de efluentes têxteis por wetlands construídos e perspectivas de reúso**

A aplicação de WCs para o tratamento de efluentes têxteis tem ganhado relevância crescente como estratégia de baixo custo e elevada compatibilidade ambiental. Esses sistemas, que combinam processos físicos, químicos e biológicos, têm se mostrado promissores para a remoção de corantes recalcitrantes, carga orgânica e sólidos dissolvidos, parâmetros críticos nos efluentes da indústria têxtil.

Estudos recentes reportam eficiências significativas. Silva et al. (2025) avaliaram um sistema de WCFSSV para efluente de lavanderia industrial no Brasil, observando reduções superiores a 95% em DBO e DQO, além de melhora expressiva da cor aparente, resultando em qualidade compatível com padrões de reúso não potável. Shenoy et al. (2022), na Índia, projetaram um WC híbrido para efluentes de tingimento, com remoções de até 84% de DQO e 66% de DBO, além de reduções em SST de 93% e remoção parcial de nutrientes, demonstrando potencial para substituir sistemas convencionais de lodo ativado com menor custo operacional e produção de lodo.

Pesquisas também têm destacado a integração de WCs com tecnologias complementares. Kundu et al. (2025) reportaram o uso de WCs acoplados a células de combustível microbianas (CWMFC), alcançando elevada descoloração de corantes azo, redução substancial de DQO e geração simultânea de bioeletricidade. De forma semelhante, Patel et al. (2021) observaram que a bioaugmentação com comunidades eletroativas em CWMFC aumentou significativamente a eficiência de remoção de cor e matéria orgânica em efluentes têxteis.

O reúso de efluentes tratados é uma das perspectivas mais relevantes associadas à adoção de WCs, especialmente em regiões de escassez hídrica. No setor têxtil, o reúso pode ocorrer tanto em usos não potáveis (lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, refrigeração de equipamentos, descargas sanitárias), quanto em usos industriais internos, como processos de lavagem ou etapas menos críticas do tingimento (Peiris et al., 2023).

Estudos recentes reforçam que WCs, quando bem dimensionados, podem produzir efluentes compatíveis com parâmetros de reúso definidos em normativas internacionais e nacionais, como a ABNT NBR 16783:2019 no Brasil, que regulamenta o uso de água não potável em edifícios residenciais, comerciais e industriais (ABNT, 2019). Essa compatibilidade é resultado da combinação de processos de remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica, nutrientes e corantes, que reduzem significativamente a toxicidade e melhoram a qualidade visual da água (Silva et al., 2025; Shenoy et al., 2022).

Além do contexto brasileiro, experiências internacionais têm mostrado bons resultados: Ávila et al. (2014), na Espanha, destacaram o potencial de reúso de efluentes tratados por WCFV em irrigação agrícola, enquanto Yin et al. (2019) relataram reúso seguro em processos internos da indústria após o polimento em sistemas híbridos de tratamento que incluíam WCs.

Portanto, as perspectivas de reúso estão fortemente associadas à integração de WCs em esquemas de tratamento descentralizado ou híbrido, com ganhos ambientais (redução de descargas poluentes), econômicos (diminuição do custo com captação de água) e sociais (reforço da segurança hídrica em regiões críticas). No futuro, espera-se maior ênfase na padronização de parâmetros de qualidade pós-tratamento e na validação em escala industrial, para consolidar o reúso como prática comum no setor têxtil.

#### 4. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão sistemática demonstrou que os WCs apresentam elevado potencial para o tratamento de efluentes têxteis, com remoções expressivas de cor aparente, DQO/DBO, surfactantes, corantes reativos/azo e parcela relevante de microcontaminantes, o que reforça sua aplicabilidade no reúso não potável. A literatura também evidencia que o desempenho desses sistemas depende de fatores como tempo de detenção hidráulica, características do meio-suporte e estabelecimento adequado das macrófitas, os quais influenciam diretamente os mecanismos combinados de adsorção, fotodegradação, filtração e biodegradação.

Do ponto de vista da segurança hídrica, os WCs configuram uma alternativa tecnicamente viável para ampliar a oferta de água de reúso, reduzir a pressão sobre os mananciais e favorecer estratégias descentralizadas de tratamento em contextos urbanos e industriais. Além disso, sua combinação de baixo custo operacional, simplicidade de operação e compatibilidade com infraestrutura verde reforça sua relevância como tecnologia sustentável.

Entretanto, a literatura ainda apresenta limitações importantes, especialmente quanto à heterogeneidade metodológica, ao número reduzido de estudos em escala real e de longa duração e à aplicação ainda restrita de abordagens integradas de avaliação ambiental e econômica. Nesse sentido, recomenda-se maior padronização dos protocolos analíticos e operacionais, bem como ampliação do monitoramento e da validação em condições reais de aplicação.

Em síntese, os WCs constituem uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes têxteis, e para o fortalecimento de estratégias sustentáveis de reúso da água. Avanços futuros dependem do fortalecimento de estudos multicêntricos, da integração com tecnologias complementares e da consolidação de critérios técnicos e regulatórios que ampliem sua adoção em escala prática.

## 5. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16783:2019** - Reúso de água - Diretrizes e requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ALMEIDA, E. J. R.; MAZZEO, D. E. C.; SOMMAGGIO, L. R. D.; MARIM-MORALES, M. A.; ANDRADE, A. R.; CORSO, C. R. Azo dyes degradation and mutagenicity evaluation with a combination of microbiological and oxidative discoloration treatments. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 183, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109484>

ÁVILA, C.; GARFI, M.; GARCIA, J. Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions. **Ecological Engineering**, v. 61, p. 43–49, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.048>.

BENNY, P.; CHAKRABORTY, S. Dyeing wastewater treatment in horizontal-vertical constructed wetland using organic waste media. **Journal of Environmental Management**, v. 331, art. 117213, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117213>

CASTILLO-SUÁREZ, S.; GUTIÉRREZ-ARDILA, C. M.; GONZÁLEZ-GUTIÉRREZ, C. J.; MACHADO-TORRES, J. P. A critical review of textile industry wastewater treatments: Current practices, emerging technologies and sustainability challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 22, p. 61783–61799, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29425-5>

CHANDANSHIVE, V. V.; RANE, N. R.; TAMBOLI, A. S.; GOLAVE, A. R.; KHANDARE, R. V.; GOVINDWAR, S. P. Co-plantation of aquatic macrophytes *Typha angustifolia* and *Paspalum scrobiculatum* for effective treatment of textile industry effluent. **Journal of Hazardous Materials**, S0304-3894(17)30364-3, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.021>

CHEN, S.; LI, Q.; LI, Y. et al. A spatial water footprint assessment of recycled cotton T-shirt. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 817, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010817>.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.

DILARRI, G.; DE ALMEIDA, É. J. R.; PECORA, H. B.; CORSO, C. R. Removal of Dye Toxicity from an Aqueous Solution Using an Industrial Strain of *Saccharomyces Cerevisiae* (Meyen). **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 227, p. 269, 2016.

ETANA, R.; ANGASSA, K.; GETU, T. Dye removal from textile wastewater using scoria-based vertical subsurface flow constructed wetland system. **Scientific Reports**, v. 15, art. 949, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79174-9>

FAN, J.; LIANG, S.; ZHANG, B. Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 20, p. 2448–2455, 2012.

HALEPOTO, A. W.; MAHAR, R. B.; ANSARI, A. K.; KUMAR, N. Current status and research trends of textile wastewater treatment: A review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, 1042256, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1042256>

HASSAN, I.; CHOWDHURY, S. R.; PRIHARTATO, P. K.; RAZZAK, S. A. Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential. **Processes**, v. 9, n. 11, 1917, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9111917>

HAQUE, M. M.; UDDIN, M. A.; RAHMAN, M. A. et al. Water and chemical consumption in textile processing industry of Bangladesh. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, 123806, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123806>.

HEALTHY MATERIALS LAB. **Textiles & Water**. Parsons School of Design, 2024. Disponível em: <https://healthymaterialslab.org/tool-guides/textiles-water>. Acesso em: 07 de outubro 2025.

HUSSAIN, T.; IQBAL, K.; TAZEIN, S. et al. Sustainable textile dyeing processes: eco-friendly materials and technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 597–613, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.042>.

ISLAM, M. T.; ALAM, M. Z.; KHAN, M. et al. Water use in textile wet processing: a critical review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 58, 104560, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.104560>.

IWA – INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION. Specialist group on use of macrophytes in water pollution control: **Constructed wetlands for pollution control**. **International Water Association Publishing**, Londres, 2012.

JALIL, M. A.; ISLAM, R.; RAHMAN, M. Water-saving dyeing process: a sustainable approach for exhaust dyeing of cotton fabric. **Sustainability**, v. 15, n. 21, p. 15626, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152115626>.

JAVEED, F.; FIRDAUS-E-BAREEN; SHAFIQ, M.; NAZIR, A.; SCHOLZ, M. Optimization of selected parameters in vertical, horizontal, and hybrid surface flow constructed wetland systems for improving the treatment efficiency of textile and sewage effluents. **Water**, v. 17, n. 3, art. 402, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17030402>

KADAM, S.; KHANDARE, R.; GOVINDWAR, S. Application of Green Remediation Technology in Field of Dye Effluent Management. In: **Microbial Biotechnology**, cap. 8, p. 135-174, 2022. <https://doi.org/10.1002/9781119834489.ch8>

KÄRKKÄINEN, E.; VAHALA, R.; MIKOLA, A. Textile production water use and textile wastewaters. VTT Technical Research Centre of Finland, **Telavalue Project Report**, 2024.

KIFLAY, E.; SELEMANI, J.; NJAU, K. Integrated constructed wetlands treating industrial wastewater from seed production. **Water Practice and Technology**, v. 16, n. 2, p. 504–515, 2021. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.008>

KUNDU, S.; SHARMA, S.; BANERJEE, S. Constructed wetland–microbial fuel cell (CWMFC) system for treatment of azo dye containing textile wastewater and bioelectricity

generation. **Journal of Environmental Management**, v. 345, art. 119283, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119283>

KUMAR, P. S.; GUNASUNDARI, E. Sustainable wet processing — an alternative source for detoxifying supply chain in textiles. In: MUTHU, S. (Ed.). *Detox Fash*. Springer, Singapore, p. 37–60, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4876-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4876-0_2)

LI, C.; WU, S.; DONG, R. Dynamics of organic matter, nitrogen and phosphorus removal and their interactions in a tidal operated constructed wetland. **Journal of Environmental Management**, v. 151, p. 310–316, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.011>

LI, F.; ZHOU, Y.; CHEN, H.; WANG, X. Water use and wastewater generation in textile wet processing: A case study from the Taihu Lake Basin, China. **Water**, v. 15, n. 4, 738, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15040738>

MISHRA, B.; MOHAPATRA, M.; DAS, M.; KUMAR, P. Constructed wetlands for wastewater treatment and reuse: A review on technology, design and sustainability. **Water**, v. 13, n. 4, art. 490, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13040490>

MUDULI, M.; CHANCHPARA, A.; CHOUDHARY, M.; SARAVAIA, H.; HALDAR, S.; RAY, S. Revisão crítica sobre biorreatores sustentáveis para tratamento de águas residuais e reúso de água. **Gestão Sustentável de Recursos Hídricos**, v. 8, 159, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00747-5>

NAZIR, R.; SHARMA, S.; KUMAR, R. et al. Treatment of textile effluents through constructed wetlands: performance, challenges and perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 352, 119812, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.119812>.

PATEL, A., SHAH, D., PARMAR, K. Performance of hybrid subsurface flow constructed wetland–microbial fuel cell for treatment of textile wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v.413, 127710, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127710>

PEIRIS, R. H.; DASSANAYAKE, K. B.; WIJewardena, P. A. et al. Emerging contaminants in textile wastewater and treatment by constructed wetlands. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 43085–43098, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27562-7>.

PEIRIS, B. R.; KARUNATHILAKE, H.; RATHNAYAKE, U. Water reuse and circular economy in the textile industry: A global perspective. **Sustainability**, v. 15, n. 17, 13007, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151713007>

POPLI, S.; PATEL, U. D. Destruction of azo dyes by anaerobic–aerobic sequential biological treatment: a review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 2, p. 405–420, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0499-x>

REN, H.; ZHANG, Y.; WANG, Z. et al. Water use and wastewater generation in textile dyeing industry of China. **Desalination and Water Treatment**, v. 168, p. 216–223, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23665>.

SAGGIORO, E. M. **Efeito do dióxido de titânio na decomposição fotocatalítica de substâncias persistentes no ambiente: corantes têxteis e interferentes endócrinos.** Tese (Doutorado em Ciências – Saúde Pública e Meio Ambiente) – Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ), Rio de Janeiro, 269 p., 2014.

SARATALE, R. G.; SARATALE, G. D.; CHANG, J. S.; GOVINDWAR, S. P. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 42, p. 138–157, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006>

SELVAKUMAR, S., BOOMIRAJ, K., DURAIRAJ, S., & VELUSWAMY, K. Performance evaluation of a lab-scale subsurface flow–constructed wetland system for textile industry wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 102708–102724, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29425-5>

SEZERINO, P. H.; ROUSSO, B. Z.; PELISSARI, C.; SANTOS, M. O.; FREITAS, M. N.; FECHINE, V. Y.; LOPES, A. M. B. Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: **recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção.** Fundação Nacional de Saúde (Funasa), Tubarão, 56 p., 2018.

SHEHZADI, M.; AFZAL, M.; KHAN, M. U.; ISLAM, E.; MOBIN, A.; ANWAR, S.; KHAN, Q. M. Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using *Typha domingensis* and textile effluent-degrading endophytic bacteria. **Water Research**, v. 58, p. 152–159, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.064>

SHENOY, A.; KUMAR, M.; SINGH, R. Constructed wetlands for textile wastewater treatment: performance evaluation and future outlook. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, 108789, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108789>.

SILVA, J. R. R.; SILVA, C. C.; ZAFRA-LEMONS, L.; PORTELA-CASTRO, A. L. B.; FERNANDES, C. A. Cyto and genotoxicity induced by exposure to textile production effluents on *Astyanax lacustris* (Pisces: Characidae) can be reduced after treatment through a vertical flow constructed wetland system. **Neotropical Ichthyology**, v. 23, n. 2, e250007, 2025. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-2025-0007>

SOLÍS, M.; SOLÍS, A.; PÉREZ, H. I.; MANJARREZ, N.; FLORES, M. Microbial decolouration of azo dyes: A review. **Process Biochemistry**, v. 47, n. 12, p. 1723–1748, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2012.08.014>

SONG, X.; DING, Y.; WANG, Y.; WAN, W.; WANG, G.; ZHOU, B. Comparative study of nitrogen removal and bio-film clogging for three filter media packing strategies in vertical flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 74, p. 1–7, 2015.

SONU, K.; SOGANI, M.; SYED, Z. Integrated constructed wetland-microbial fuel cell using biochar as wetland matrix: Influence on power generation and textile wastewater treatment. **Chemistry Select**, v. 6, p. 8323–8328, 2021. <https://doi.org/10.1002/slct.202102033>

STEFANAKIS, A.; AKRATOS, C. S.; TSIHRINTZIS, V. A. Vertical Flow Constructed Wetlands: **Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment.** Elsevier, Oxford, 2014.

STWI – SWEDISH TEXTILE WATER INITIATIVE. Sustainable Textile Water Initiative. Stockholm International Water Institute, Estocolmo, 2024. Disponível em: <https://siwi.org/sustainable-textile-water-initiative>. Acesso em 07 de Outubro de 2025.

TEXTILE EXCHANGE. Materials Market Report 2024. Textile Exchange, 2024. Disponível em: <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2024/>. Acesso em: 10 out. 2025.

UDDIN, M. A.; RAHMAN, M. A.; HAQUE, M. M. et al. Water and chemical use efficiency in textile industries: a case study from Bangladesh. **PLOS Sustainability and Transformation**, v. 2, n. 1, e0000072, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000072>.

WATER GOVERNANCE MAPPING REPORT – BANGLADESH. Stockholm International Water Institute (SIWI), 2017. Disponível em: <https://siwi.org/wp-content/uploads/2017/06/Water-governance-mapping-report-Bangladesh.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

WANG, M.; ZHANG, D.; DONG, J.; TAN, S. K. Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: A review. **Hydrobiologia**, v. 805, n. 1, p. 1–31, 2018.

WU, S.; KUSCHK, P.; BRIX, H.; VYMAZAL, J.; DONG, R. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. **Water Research**, v. 57, p. 40–55, 2014.

YANTO, D. H. Y.; TACHIBANA, S. Enhanced biodegradation of asphalt in the presence of Tween surfactants, Mn<sup>2+</sup> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> by *Pestalotiopsis* sp. in liquid medium and soil. **Chemosphere**, v. 103, p. 105–113, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.044>

YIN, H.; CHEN, X.; LI, G.; CHEN, Y.; WANG, W.; AN, T.; WONG, P. K.; ZHAO, H. Sub-lethal photocatalysis bactericidal technology cause longer persistence of antibiotic-resistance mutant and plasmid through the mechanism of reduced fitness cost. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 245, p. 698–705, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.01.041>

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes: caracterização química, toxicologia, métodos de detecção e tratamento**. Cultura Acadêmica, São Paulo, 347 p., 2016.

## NOTAS

### CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Concepção e elaboração do manuscrito: C. C. Silva

Coleta de dados: C. C. Silva

Análise de dados: C. C. Silva

Discussão dos resultados: C. C. Silva

Revisão e aprovação: J. A. A. Pimenta, C. T. Benatti

### PREPRINTS

O manuscrito não é um preprint.

### CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

### DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA E OUTROS MATERIAIS

Os dados foram publicados no próprio artigo. Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo está incluído no corpo do artigo.

### ANUÊNCIA DE AVALIAÇÃO ABERTA

Não.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.