

REVISTA SANEAS

Ano XVI • Edição 95 • Janeiro a Março de 2026



REÚSO DE ÁGUA: SOLUÇÃO ESTRATÉGICA E FUNDAMENTAL PARA A CRISE DE ESCASSEZ HÍDRICA

Diante de crises hídricas recorrentes, o reúso direto e indireto emerge como solução fundamental para o abastecimento da população e de diversos setores econômicos no Brasil. Especialistas compartilham perspectivas sobre avanços tecnológicos, desafios regulatórios e a importância da ciência aplicada para assegurar a segurança hídrica nacional



AESabesp 40 anos: começa a série que aborda a trajetória da Associação e sua contribuição ao saneamento

Entrevista especial: Samanta Takimi, diretora-presidente da Corsan

Inova AESabesp: conheça como o Aterro Zero transforma gestão ambiental em cultura



Matéria de capa

Reúso de água: solução estratégica e fundamental para a crise de escassez hídrica

08

Outras matérias

O reúso na prática 11

Assemae apoia reúso nos municípios com suporte técnico para operação segura e acessível 13

Norma da ANA para reúso não potável de esgoto deve aliviar crise hídrica e contribuir para universalização 15

O papel da pesquisa no avanço do reúso de água 18

Artigos técnicos

Um modelo qualitativo de avaliação de risco para o reúso de água: riscos relacionados à irrigação agrícola no Brasil 26

Mapeamento e análise dos riscos hidrológicos no município de São Paulo/SP: impactos na drenagem urbana 43

Entrevista especial



Samanta Takimi,
diretora-presidente da
Corsan

04

Inova AESabesp



Aterro Zero
transforma gestão
ambiental em cultura
na GBMX

24

AESabesp 40 anos

De um país sem saneamento à construção da identidade do setor

20

Associação dos Engenheiros da Sabesp
Rua Treze de Maio, 1642
Bela Vista - 01327-002 - São Paulo/ SP
Fone: (11) 3263 0484
Fax: (11) 3141 9041
www.aesabesp.org.br
aesabesp@aesabesp.org.br



Órgão Informativo da Associação dos Engenheiros da Sabesp
Fundada em 15/09/1986

Diretoria Executiva

Presidente: Agostinho J. G. G. G. G.
Diretor Administrativo: Walter Antonio Orsati
Diretor Financeiro: Abiatar Castro de Oliveira
Diretora Socioambiental: Ester Feche Guimarães
Diretor de Comunicação e Marketing: Kleber dos Santos

Diretoria Adjunta

Diretoria Técnica: Reynaldo Eduardo Young Ribeiro
Diretoria de Esportes e Lazer: Evandro Nunes de Oliveira
Diretoria de Polos Regionais: Lara Dias de Jesus
Diretoria Social: Viviana Marli Nogueira de Aquino Borges
Diretoria Inovações: Pierre Ribeiro de Siqueira

Conselho Deliberativo

Presidente: Helieder Rosa Zanelli
Membros: Allan Saddi Arnesen, Alzira Amancio Garcia, Aurélio Fiorindo Filho, Benemar Movikawa Tarifa, Eduardo Bronzatti Morelli, Hilton Alexandre de Oliveira, Lara Regina Soares Chao, Ivo Nicolielo Antunes Junior, Nelson César Menetti, Nilzo René Fumes, Nizar Qbar, Olavo Alberto Prates Sachs, Patricia Barbosa Taliberti, Paulo Levy de Souza Rodrigues, Renato Hochgreb Frazão e Sulamita França Santos

Conselho Fiscal

Nilton Gomes de Moraes, Zenivaldo Ascensão dos Santos e Sandreli Droppa Leta

Coordenadores

Polos da RMSP: Antonio Ramos Batagliotti
Polo dos Aposentados: Paulo Victor Vieira Sampaio
Polo Feminino: Paloma Damasceno
Relações Institucionais: Lucimar Santos Werneck
Cursos: Cícero Ferreira Batista
Inovação: Alisson Gomes de Moraes
Contratos Terceirizados: Nizar Qbar
Comitê Encontro Técnico/Fenasan: Olavo Alberto Prates Sachs
Missões Técnicas: Aurélio Fiorindo Filho

Administração

Coordenadora Administrativo-Financeira: Viviane Andrade
Administrativos: Andrey Cordeiro, Israel Pacheco, João Sayon, Kátia Nascimento Freitas, Rodrigo de Oliveira e Yasmin Rodrigues

Marketing

Estéfano Memmo

Conselho Editorial e Fundo Editorial

Coordenadora: Débora Torres
Membros: Nelson Cesar Menetti, Kleber dos Santos, Débora Soares, Eliana Kitahara, Eliana Cristina Rodrigues da Costa, Sandreli Droppa Leta e Ana Paula Vieira Rogers

Comissão Organizadora 37º Encontro Técnico AESABESP / Fenasan 2026

Presidente: Olavo Alberto Prates Sachs
Membros: Agostinho de Jesus Gonçalves G. G. G., Alisson Gomes de Moraes, Alzira Amancio Garcia, Ana Paula Rogers, Cícero Ferreira Batista, Eduardo Bronzatti Morelli, Ester Feche Guimarães, Fabio Rocha, Gilberto Azevedo, Helieder Rosa Zanelli, Hilton Alexandre de Oliveira, Israel Henrique, Jorge Rabello, Katia Freitas, Kleber dos Santos, Lucimar Santos Werneck, Marcelo Tadeu Muniz Pereira, Márcia Camillo da Cruz, Mariza Protá, Monique Funke, Nelson César Menetti, Nilzo Fumes, Olavo Alberto Prates Sachs, Patricia Goularth, Patricia Taliberti, Paulo Victor Vieira Sampaio, Pierre Ribeiro de Siqueira, Reynaldo Young, Sonia Maria Nogueira e Silva, Sulamita França Santos, Viviana M. N. de A. Borges e Walter Antonio Orsati
Equipe de Apoio: João Augusto Poeta, Katia Freitas, Nilton Gomes de Moraes, Nizar Qbar, Rodrigo Oliveira Catanho, Suely Melo, Viviane Andrade, Wanderley Pavão Junior

Polos AESABESP da Região Metropolitana - RMSP

Polo AESABESP Centro: Marco Aurélio Daraia
Polo AESABESP Costa Carvalho: Eduardo Conselheiro
Polo AESABESP Leste: Marcia Novais Bomfim
Polo AESABESP MT: Jefferson Alexandre de Aguiar
Polo AESABESP Norte: Marcelo Aparecido dos Santos Carvalho
Polo AESABESP Oeste: Claudemir Jacob Junior
Polo AESABESP Ponte Pequena: Hilton Alexandre de Oliveira
Polo AESABESP Sul: Anderson Cleiton Barbosa

Polos AESABESP Regionais

Polo AESABESP Baixada Santista: Mario Benetati Filho
Polo AESABESP Botucatu: Leandro Cesar Bizelli
Polo AESABESP Caraguatatuba: Daniely Muriel da Silva
Polo AESABESP Franca: Fabricio Tasso
Polo AESABESP Itatiba: Vanessa Egidio Pereira
Polo AESABESP Itapetininga: Jorge Luis Rabelo
Polo AESABESP Lins: Carlos Toledo da Silva
Polo AESABESP Presidente Prudente: Anselmo Kenji Tardio Matuzaki
Polo AESABESP Vale do Paraíba: Rodrigo Campos da Silva
Polo AESABESP Vale do Ribeira: Anderson Takeo P. Nakazawa

Produção Editorial: Foco21 Comunicação

Jornalista Responsável - Editora-chefe: Ana Paula Vieira Rogers
MTB 27666 - anapaularogers@gmail.com
Editora: Suely Melo

Fotos

Equipe Estevão Buzato e acervo AESABESP

Projeto visual gráfico e diagramação

Neopix DMI

contato@neopixdmi.com.br

Caros(as) leitores e leitoras,

É uma grande satisfação apresentar a primeira Revista Saneas de 2026, um ano muito especial para a AESABESP, que celebra 40 anos de atuação pelo desenvolvimento do saneamento, pelo meio ambiente, pela saúde e qualidade de vida das pessoas e do planeta.

Nesta edição, trazemos uma reportagem especial sobre reúso de água, sua aplicação no Brasil e casos de sucesso que demonstram que estamos na direção certa no uso de soluções para o enfrentamento dos eventos adversos trazidos pela mudança climática.

Março é o Mês da Água, um tema ao qual nos dedicamos o ano todo. Aliás, dedicamos nossas trajetórias como sanitaristas. Portanto, um período importante para estimular discussões que podem ajudar o setor rumo à universalização.

E é também o Mês da Mulher. Na entrevista especial, conversamos com Samanta Takimi, diretora-presidente da Corsan, que aborda os desafios do setor e o papel das profissionais, entre outros temas.

E os 40 anos da AESABESP também ganham uma seção especial nas quatro edições de 2026: fazemos uma viagem no tempo e relembremos a história da Associação e suas contribuições para o desenvolvimento do saneamento nessas quatro décadas.

Celebramos o passado, mas estamos sempre com o olhar voltado para o futuro: na coluna Inova AESABESP, apresentamos mais uma abordagem de inovação em nosso setor.

E mais novidades: este ano, nossas edições da Saneas estão sendo lançadas em webinars que trazem convidados especiais nos canais do YouTube, AESABESP e TV Água e Saneamento. E no site www.saneasonline.com.br traremos, ao longo do ano, 40 entrevistas com especialistas refletindo sobre temáticas do saneamento, meio ambiente, saúde e inovação.

E ainda teremos diversas atividades das comemorações dos 40 anos, culminando no 37º Encontro Técnico e Fenasan 2026, o maior evento do setor das Américas, que fará história!

Boa leitura a todas e todos!

Agostinho Gerales

Presidente da AESABESP – Gestão 2025-2027





Samanta Takimi, diretora-presidente da Corsan

Por
Juliana Ferreira

Primeira mulher a ocupar a cadeira de diretora-presidente da Corsan, Samanta Takimi atua à frente das estratégias que pretendem transpor as barreiras da universalização no Rio Grande do Sul. Em entrevista à Revista Saneas, Takimi falou também sobre os desafios impostos pelos eventos climáticos adversos, as iniciativas de reúso da água para segurança hídrica no país e do seu papel como mulher no setor de saneamento. Confira.

“ A presença de mulheres em cargos de decisão estratégica é importante porque amplia a pluralidade de perspectivas e melhora a qualidade da tomada de decisão. Em uma agenda complexa como a climática, isso faz diferença na formulação de políticas mais inclusivas, mais conectadas à realidade social e mais consistentes no longo prazo.”

Revista Saneas - O Brasil enfrenta grandes desafios para alcançar a universalização do saneamento. Quais são hoje os principais entraves para avançarmos nesse objetivo e qual tem sido o papel das empresas (públicas e privadas) nesse processo?

Samanta Takimi - A universalização do saneamento exige enfrentar entraves históricos, como o déficit de infraestrutura, a necessidade de financiamento de longo prazo, a complexidade regulatória e a dificuldade de executar obras em áreas urbanas já densamente ocupadas. O papel das companhias é transformar esse desafio em capacidade real de entrega, com investimento, planejamento e eficiência operacional. Na Corsan, o novo ciclo de gestão ampliou significativamente a capacidade de investimento, com previsão de R\$ 1,5 bilhão por ano, o que acelera a expansão dos sistemas de água e esgoto e aproxima o Rio Grande do Sul das metas do Marco do Saneamento.

Revista Saneas - A agenda climática tem impactado diretamente a gestão dos recursos hídricos e dos sistemas de saneamento. Como as mudanças climáticas estão alterando o planejamento e a operação dos serviços de água e esgoto na Corsan?

Samanta Takimi - As mudanças climáticas passaram a exigir um planejamento operacional cada vez mais resiliente da Corsan. No Rio Grande do Sul, convivemos com eventos extremos, como estiagens prolongadas e enchentes severas, que afetam diretamente a captação, o tratamento e a distribuição de água. Diante desse cenário, a Companhia vem reforçando o monitoramento, os planos de contingência, a diversificação da matriz hídrica e o uso de automação e telemetria para acompanhar os sistemas em tempo real e dar mais agilidade à operação. O objetivo é aumentar a capacidade de resposta, preservar a qualidade da água tratada e reduzir riscos de descontinuidade nos serviços.

Revista Saneas - Eventos adversos, como secas e enchentes, têm se tornado mais frequentes. De que forma o setor de saneamento pode se preparar para aumentar a resiliência das infraestruturas e garantir a continuidade dos serviços à população? Como tem sido esse trabalho na Corsan?

Samanta Takimi - Para aumentar a resiliência, o setor de saneamento precisa combinar infraestrutura mais robusta, redundância de fontes e sistemas, monitoramento contínuo e planos de contingência. Isso inclui diversificação de fontes de abastecimento de água, interligações entre sistemas, reservação, geradores para situações emergenciais e modernização de estruturas críticas. Na Corsan, esse trabalho tem avançado com perfuração de poços, instalação de geradores de pronta resposta, ampliação de adutoras estratégicas, modernização de sistemas de bombeamento e ações para reforçar a segurança hídrica e a capacidade de resposta a eventos extremos.

Revista Saneas - Quais são as ações da empresa hoje em áreas rurais?

Samanta Takimi - Hoje, a atuação da Corsan está concentrada nas áreas urbanas dos municípios, conforme os contratos vigentes. Nas áreas rurais, a principal interface da Companhia está relacionada à preservação dos mananciais que abastecem os sistemas urbanos. Nesse contexto, a Corsan desenvolve ações de proteção ambiental e segurança hídrica, com destaque para iniciativas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que incentivam a conservação de nascentes, solo e cobertura vegetal em propriedades rurais. É uma atuação voltada à sustentabilidade do abastecimento, à proteção dos recursos hídricos e à resiliência dos sistemas diante das mudanças climáticas.

Revista Saneas - O tema desta edição da Saneas é o Reúso de Água. Do ponto de vista da governança climática, como o Brasil pode acelerar a adoção do reúso para mitigar os riscos de escassez hídrica que ameaçam tanto o setor produtivo quanto a segurança alimentar?

Samanta Takimi - O reúso de água deve ser tratado como parte da estratégia de segurança hídrica do país, especialmente diante das mudanças climáticas e da maior pressão sobre os mananciais. Para ampliar essa agenda, o Brasil precisa avançar com regulação clara, critérios técnicos e segurança sanitária para usos não potáveis em atividades urbanas, operacionais e industriais. Na Corsan, essa prática já está presente em serviços urbanos e operacionais, como lavagem de vias, limpeza de áreas públicas e manutenção de redes com caminhões hidro-jato, substituindo água potável em

usos que não exigem esse padrão. É uma medida que ajuda a preservar os recursos hídricos, reduzir a pressão sobre o abastecimento e reforçar a resiliência do saneamento.

Revista Saneas - Grandes encontros do setor, como a Fenasan, têm papel importante na troca de conhecimento e no avanço tecnológico. Qual é a importância desses espaços para o desenvolvimento do saneamento no Brasil?

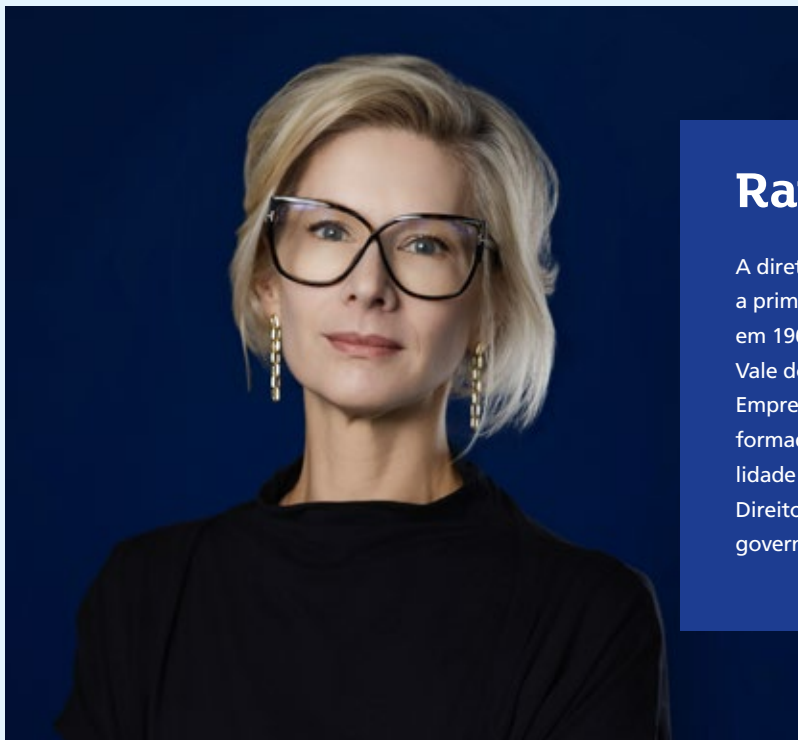
Samanta Takimi - A Fenasan e outros encontros do setor são importantes porque ajudam a aproximar o saneamento das melhores práticas e das inovações que já estão em desenvolvimento ou aplicação. Isso envolve desde a atualização de equipamentos, sistemas e processos já consolidados até o uso de novas tecnologias, como automação, digitalização e inteligência artificial, para tornar a operação mais eficiente e qualificada. Também são espaços importantes para que empresas como a Corsan acompanhem tendências, identifiquem soluções aplicáveis à sua operação e fortaleçam uma agenda de modernização alinhada aos desafios atuais do saneamento.

Revista Saneas - Agora que a COP30 em Belém foi concluída, qual o principal legado prático que o evento deixou para a agenda de adaptação climática urbana no Brasil, especialmente no que diz respeito à infraestrutura de águas?

Samanta Takimi - A COP30 deixou como legado prático o reforço de que adaptação climática precisa estar no centro do planejamento urbano. E isso tem relação direta com saneamento, drenagem e segurança hídrica. Para o setor, ficou ainda mais evidente que não há cidade resiliente sem infraestrutura de água e esgoto preparada para enfrentar eventos extremos, com planejamento, investimento e capacidade de resposta.

Revista Saneas - Para os gestores e engenheiros que leem a Saneas: como o setor de saneamento pode se posicionar de forma mais protagonista nas próximas rodadas de negociação climática da ONU?

Samanta Takimi - O setor de saneamento pode ganhar mais protagonismo nas negociações climáticas quando se apresenta como parte da infraestrutura de adaptação das cidades. Para isso, precisa levar mais evidência técnica: indicadores, projetos, resultados e necessidades de financiamento. Água, esgoto, drenagem, reúso e segurança hídrica precisam entrar nesse debate como soluções concretas de resiliência urbana, e a própria COP30 já apontou nessa direção ao aproximar adaptação, cidades, infraestrutura e água na agenda climática.



Raio X

A diretora-presidente da Companhia Riograndense é a primeira mulher a comandar a Companhia, fundada em 1966. É advogada graduada pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), tem MBA em Direito Empresarial, é pós-graduada em Direito Público e formada no Programa Avançado em ESG e Sustentabilidade pela Saint Paul. Atualmente, cursa mestrado em Direito Econômico com ênfase em políticas públicas, governança e regulação.

Revista Saneas - O setor de saneamento tem historicamente maior participação masculina. Como você avalia a evolução da atuação feminina na área e quais caminhos ainda precisam ser percorridos para ampliar a presença das mulheres em posições de liderança?

Samanta Takimi - O saneamento é um setor historicamente masculino, sobretudo em funções técnicas e operacionais, mas a participação feminina vem crescendo de forma consistente. Esse avanço é importante não apenas do ponto de vista da equidade, mas também da qualidade da gestão e da tomada de decisão. Ambientes diversos tendem a reunir perspectivas mais amplas, compreender melhor a complexidade dos desafios e construir soluções mais consistentes. Em setores essenciais, como o saneamento, isso é ainda mais relevante. O caminho, daqui para frente, passa por ampliar a presença de mulheres em posições de liderança e consolidar ambientes de trabalho cada vez mais inclusivos e preparados para esse avanço.

Revista Saneas - Na sua trajetória profissional, quais foram os principais desafios enfrentados como mulher em um setor técnico e estratégico como o saneamento?

Samanta Takimi - Sou a primeira mulher a comandar a Corsan em seis décadas. Vejo isso como resultado de uma governança mais profissional, em que

a competência pesa mais do que a tradição. Quando se reduz a subjetividade nos processos de decisão, amplia-se também o espaço para que mais mulheres cheguem a posições de liderança. Na minha trajetória, um dos principais desafios foi consolidar minha atuação em um setor historicamente masculino, marcado por padrões de liderança muito consolidados. Ao mesmo tempo, essa experiência reforça uma convicção: organizações mais diversas tomam decisões melhores, porque ampliam perspectivas e qualificam a gestão.

Revista Saneas - Neste Mês da Mulher, como avalia a importância de ter mulheres ocupando cargos de decisão estratégica para garantir que as políticas climáticas sejam mais inclusivas e empáticas?

Samanta Takimi - A presença de mulheres em cargos de decisão estratégica é importante porque amplia a pluralidade de perspectivas e melhora a qualidade da tomada de decisão. Em uma agenda complexa como a climática, isso faz diferença na formulação de políticas mais inclusivas, mais conectadas à realidade social e mais consistentes no longo prazo. No saneamento, essa diversidade é ainda mais relevante, porque o setor tem impacto direto sobre saúde, qualidade de vida e redução de vulnerabilidades. Lideranças mais diversas ajudam a construir respostas mais completas para desafios que também são cada vez mais complexos.

REÚSO DE ÁGUA:

SOLUÇÃO ESTRATÉGICA E FUNDAMENTAL PARA A CRISE DE ESCASSEZ HÍDRICA

Diante de crises hídricas recorrentes, o reúso direto e indireto emerge como solução fundamental para o abastecimento da população e de diversos setores econômicos no Brasil. Especialistas compartilham perspectivas sobre avanços tecnológicos, desafios regulatórios e a importância da ciência aplicada para assegurar a segurança hídrica nacional.



Por
**Sofia Jucon,
Juliana Ferreira
e Luciane Murae**

No cenário contemporâneo de mudanças climáticas e pressões sobre os recursos naturais, o Brasil enfrenta um paradoxo: embora detentor de uma das maiores reservas de água doce do mundo, sofre com crises hídricas recorrentes que ameaçam o abastecimento e a economia nas mais diversas vertentes. Diante desse desafio, o reúso de água deixa de ser uma alternativa periférica para se consolidar como uma solução estratégica e fundamental. O que antes era tratado estritamente como efluente, um passivo ambiental a ser removido, hoje é tecnicamente redefinido como água de reúso: um ativo estratégico resultante de processos controlados de engenharia que permitem fechar o ciclo hidrológico em escala local. Mais do que uma alternativa, o reúso de água direto e indireto consolida-se como o pilar fundamental para a segurança hídrica e o desenvolvimento socioeconômico do Brasil diante de um cenário climático em constante transformação.

Para os profissionais do setor, a definição de reúso de água vai além do conceito básico. Trata-se da aplicação de barreiras múltiplas e tecnologias avançadas, como a ultrafiltração, a osmose reversa e os processos oxidativos, para garantir que a água atinja padrões de qualidade rigorosos, específicos para cada finalidade, seja ela industrial, agrícola ou de recarga de aquíferos. É a ciência aplicada para transformar escassez em disponibilidade. Dessa forma, impulsionado pelo Novo Marco Legal do Saneamento e pela urgência da adaptação climática, o país vive um momento em que o efluente tratado passa a ser visto como um ativo de valor.

De acordo com Ana Silvia Santos, presidente do Instituto Reúso de Água, o panorama atual do reúso no Brasil revela uma evolução técnica contínua, distanciando-se de um passado de estagnação. “O cenário que observamos hoje é significativamente superior ao de ontem. Cada avanço, por mais pontual que pareça, representa um progresso vital em relação à inércia anterior”, afirma a especialista.

Para Ana Silvia, essa mudança não é apenas quantitativa, mas qualitativa e conceitual. Ela destaca que o reúso deixou de ser tratado como uma ferramenta isolada ou uma solução de nicho para ser incorporado como um componente intrínseco de uma gestão hídrica integrada. “Estamos amadurecendo para uma visão na qual o reúso é enxergado como parte fundamental da solução para a escassez hídrica, permitindo uma abordagem holística para a resiliência dos sistemas de abastecimento”, observa Ana Silvia.

Embora o país não apresente índices tão elevados quanto Israel, que reutiliza cerca de 90% de seu esgoto tratado devido ao seu histórico de escassez severa, no Brasil, a diversidade regional impõe que o reúso seja adaptado às realidades locais, desde o semiárido até os grandes centros industriais. Por isso, o papel da pesquisa e das instituições de ensino é vital para a evolução do conceito e ampliação do uso da água de reúso em diversos setores e regiões.

Neste âmbito, José Carlos Mierzwa, professor Titular na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP), destaca que o avanço tecnológico é a garantia de eficiência e qualidade de vida. No entanto, ele ressalta a necessidade de uma mudança de paradigma na formação acadêmica. “Os cursos de Engenharia, principalmente vinculados à área ambiental, precisariam repensar um pouco mais essa visão de meio ambiente e priorizar a visão de que você tem que ser tecnológico para ter soluções adequadas para problemas específicos”, defende Mierzwa. Para ele, problemas complexos demandam abordagens arrojadas e investimento em tecnologia de ponta para assegurar que o recurso investido entregue os resultados necessários à população.

O Marco Legal do Saneamento é citado pelos especialistas como um catalisador de oportunidades. Ao estabelecer metas de universalização, a legislação criou um ambiente de negócios favorável à implementação de projetos de reúso. Ana Silvia ressalta que a crise hídrica acaba sendo o motor que impulsiona o governo e as empresas a agir. A visão de que o reúso é uma solução integrada permite que grandes indústrias e concessionárias colaborem para reduzir a demanda por água potável em fins menos nobres.

Segurança hídrica integral

A segurança hídrica é uma questão de sobrevivência e manutenção da ordem social diante dos desafios que a mudança climática tem trazido para a sociedade. Para Mierzwa, a população tem que entender que a questão do problema de abastecimento é séria. “A falta de água é uma calamidade para todo mundo”, enfatiza. O professor também desmistifica o debate sobre os custos da tecnologia de reúso. “Qual é a água mais cara? É aquela que a gente não tem”, provoca. Para ele, o custo tecnológico é adequado se garantir a existência e a qualidade de vida em uma região que, de outra forma, seria inviável.

Para a presidente do Instituto Reúso de Água, a recorrência de períodos críticos de escassez está mudando a percepção nacional, forçando o país a enxergar o efluente tratado não como um descarte, mas como uma salvaguarda. “A crise hídrica vai acabar nos impulsionando para isso. E que seja assim, pois hoje já vejo o Brasil enxergando o reúso como parte fundamental da solução”, destaca Ana Silvia.

Nesse contexto, o reúso de água se consolida como o elo que permite a continuidade da produção e o bem-estar social, transformando escassez em oportunidade de inovação em prol da segurança hídrica integral. A expectativa é que, com o amadurecimento das políticas públicas e o avanço tecnológico, o Brasil deixe de tratar o reúso como uma medida emergencial para adotá-lo como uma política de Estado perene.

“Hoje eu vejo o Brasil enxergando o reúso já como parte da solução”, conclui Ana Silvia, reforçando que, embora o caminho ainda seja longo, a direção escolhida é o único caminho possível para a resiliência hídrica em nível nacional.

Nas páginas seguintes, você conhecerá experiências brasileiras exitosas.

Hoje, já vejo o Brasil enxergando o reúso como parte fundamental da solução.”

Ana Silvia Santos



Qual é a água mais cara? É aquela que a gente não tem.”

José Carlos Mierzwa

O reúso **na prática**

Com o avanço da escassez hídrica e a crescente pressão sobre os mananciais, o reúso de água ganha cada vez mais espaço como alternativa estratégica para ampliar a disponibilidade hídrica e promover o uso mais eficiente dos recursos. Experiências já implantadas demonstram a viabilidade técnica, ambiental e econômica dessa prática. A seguir, alguns exemplos que evidenciam o potencial do reúso como ferramenta para fortalecer a segurança hídrica e a sustentabilidade.



Ivana Wuo Pereira Vidal,
diretora de Tratamento de
Esgotos da Sabesp

Artigo: Com reúso e inovação, Sabesp reforça estratégia para garantir água no futuro

O reúso de água consolidou-se como um dos pilares da Sabesp para reforçar a segurança hídrica do Estado, evoluindo de iniciativas pontuais para um programa estruturado e alinhado ao planejamento estratégico da Companhia. Essa tecnologia é essencial diante da crescente pressão climática sobre os recursos hídricos, pois permite substituir o uso de água potável em atividades industriais e urbanas, preservando-a para o consumo da população. Obtida a partir do tratamento de efluentes, a água de reúso é aplicada em processos como lavagem de equipamentos, resfriamento de caldeiras, limpeza urbana, irrigação de áreas verdes e apoio a feiras livres.

A Sabesp produz, em média, 500 L/s de água de reúso em suas ETs São Miguel Paulista, Jesus Netto, Parque Novo Mundo e ABC. Nesta última, está instalada a Aquapolo Ambiental, uma das maiores estações de reúso do mundo e referência em tratamento avançado.

Em operação há mais de 13 anos, o Aquapolo foi projetado para produzir até 1.000 L/s e atualmente opera com capacidade de 650 L/s, atendendo indústrias do Polo Petroquímico de Capuava e empresas dos setores petroquímico, resinas, embalagens plásticas, cobre, alumínio e pneus. Em 2025, a unidade ultrapassou 150 milhões de m³ produzidos, contribuindo de forma significativa para a economia de água potável. Operado em parceria com a GS Inima, o sistema atende padrões rigorosos e representa uma solução sustentável de longo prazo.

Além do reúso industrial, a Sabesp avança no estudo da recarga de mananciais como alternativa sustentável de médio e longo prazos para ampliar a oferta hídrica na Região Metropolitana de São Paulo. Equipes técnicas realizam estudos comparativos com experiências consolidadas na Califórnia, Barcelona, Cingapura e no Distrito Federal, onde o reúso

de esgoto tratado é aplicado para reforço de mananciais. Após a conclusão dos estudos, todas as etapas de licenciamento seguirão rigorosamente a legislação vigente.

Paralelamente, a Companhia aperfeiçoou seu planejamento hídrico com modelagens hidrológicas, análises de cenários climáticos e revisões periódicas, permitindo antecipar

riscos e adaptar a operação às variações de disponibilidade hídrica. A modernização dos sistemas produtores permanece como eixo estratégico, com interligações que ampliam a flexibilidade do Sistema Integrado Metropolitano e programas de automação, telemetria e setorização voltados à redução de perdas.

Em síntese, a Sabesp conduz um conjunto

integrado de ações estruturais, operacionais e ambientais que combinam modernização, reúso, recarga, eficiência e governança, consolidando as bases de uma matriz hídrica mais resiliente e preparada para enfrentar desafios futuros.



Aquapolo amplia oferta de água de reúso para indústrias do ABC Paulista

O projeto Aquapolo, uma parceria entre a GS Inima Industrial e a Sabesp, é considerado o maior empreendimento de produção de água de reúso da América do Sul e um dos maiores do mundo. A iniciativa fornece água de reúso para o Polo Petroquímico de Capuava e outras indústrias da região do ABC Paulista.

Com capacidade de produzir até mil litros por segundo, volume equivalente ao abastecimento de uma cidade de cerca de 500 mil habitantes, o sistema utiliza esgoto tratado pela ETE ABC como matéria-prima. A cada litro de água de reúso gerado, um litro de água potável deixa de ser utilizado.

Para o diretor-presidente da Aquapolo, Marcio da Silva José, o impacto é muito positivo na preservação de corpos hídricos na região metropolitana: “Atualmente, as indústrias do Polo utilizam a água reciclada para atender 97% de todas as suas necessidades. Dessa forma, não competem pela água bruta, presente nos corpos hídricos naturais, com a população. Ao longo dos seus 13 anos de operação, a Aquapolo já forneceu mais de 150 milhões de metros cúbicos, o que equivale ao abastecimento de uma cidade de 300 mil habitantes”.

O papel do reúso industrial na agenda nacional de enfrentamento da escassez hídrica é crucial: “A estabilidade na qualidade, disponibilidade e previsibilidade proporcionadas pela solução de reciclagem de água são fundamentais aos setores produtivos, seja industrial ou agrícola. Com tal solução, é possível garantir a adaptação às mudanças climáticas e a resiliência hídrica em setores intensivos em água, garantindo a continuidade operacional, a preservação de empregos, o retorno de investimentos realizados e até mesmo a segurança para novos investimentos nos sites abastecidos por soluções de reciclagem, pois são resilientes”, conclui.

Assemae apoia reúso nos municípios com suporte técnico para operação segura e acessível

A Assemae acompanha de perto o avanço do reúso da água, que será pauta no seu 54º Congresso Nacional de Saneamento em maio deste ano. O presidente Esmeraldo Pereira Santos conta como a associação apoia os municípios e contribui para que a prática se torne comum, segura e acessível em todo o país.

Revista Saneas - Como a Assemae atua no incentivo ao reúso de água, especialmente nos municípios de pequeno e médio porte?

Esmeraldo Pereira Santos - Essa é uma agenda estratégica, pois amplia a segurança hídrica, reduz pressões sobre mananciais e promove uma gestão mais eficiente dos recursos. Os municípios de pequeno e médio porte enfrentam desafios específicos, e estamos estruturando ações de apoio aos associados, como materiais técnicos e guias práticos; capacitações, oficinas e webinários; articulação com órgãos federais e agências de fomento para financiamentos e linhas de crédito; e apoio a tecnologias e marcos regulatórios adaptados à realidade local.

Revista Saneas - Quais são as principais barreiras dos municípios no reúso da água e como a Assemae ajuda a superá-las?

Esmeraldo Pereira Santos - Os municípios enfrentam uma série de barreiras, como ausência de normas locais claras, insegurança jurídica e dificuldade de harmonizar legislações municipais, estaduais e federais. Há também limitação de recursos para infraestrutura, estudos técnicos e operação dos sistemas. Somado a isso, temos os desafios diários dos serviços de saneamento público municipal. A Assemae ajuda a transpor essas barreiras, fortalecendo a capacidade dos serviços municipais em um reúso cada vez mais comum, seguro e viável.

Revista Saneas - A Assemae possui ações voltadas à disseminação de boas práticas em reúso?

Esmeraldo Pereira Santos - A Assemae está estruturando uma série de instrumentos para apoiar os municípios na adoção de práticas de reúso de água, essencial para a sustentabilidade dos serviços municipais de saneamento. Estamos nos preparando para disponibilizar novos materiais técnicos, orientações práticas, capacitações e espaços de troca de experiências voltados especialmente aos municípios de pequeno e médio porte.

Revista Saneas - Quais municípios associados se destacam no reúso da água?

Esmeraldo Pereira Santos - Praia Grande (SP) utiliza água captada por cisternas instaladas em prédios da Secretaria Municipal de Serviços Urbanos para atividades como lavagem de ruas, limpeza de feiras e manutenção de áreas públicas. O resultado é uma economia significativa de água potável, redução de custos operacionais e maior sustentabilidade nas rotinas do município. Santos (SP) reaproveita a água dos chuveirinhos da orla, reduzindo o desperdício e a pressão sobre o sistema de abastecimento. Essas experiências mostram que o reúso contribui para a segurança hídrica, fortalece a gestão ambiental e serve como referência para que outros municípios adotem soluções semelhantes, adaptadas às suas

realidades. No SAAE de Passos (MG), temos o Programa SAAE Sustentável, que desenvolve ações de reúso de água em atividades internas e operacionais, contribuindo para a economia de água potável, a redução de custos e o fortalecimento da sustentabilidade hídrica do município.

Revista Saneas - Como o reúso da água contribui para a resiliência hídrica diante das mudanças climáticas e da crescente pressão sobre os recursos hídricos?

Esmeraldo Pereira Santos - Ao reaproveitar água já utilizada em processos urbanos, os municípios reduzem a dependência de mananciais, aliviam a demanda sobre sistemas de abastecimento e criam uma camada adicional de segurança em períodos de estiagem, eventos extremos e variações climáticas cada vez mais frequentes. Além disso, o reúso contribui para a eficiência operacional dos serviços de saneamento, diminui custos e amplia a sustentabilidade das atividades municipais.

A Assemae vê essa agenda como absolutamente estratégica para o futuro do saneamento público no Brasil. Nosso compromisso é apoiar os serviços municipais para que possam incorporar o reúso de forma segura, eficiente e adaptada às suas realidades, contribuindo para cidades mais resilientes, sustentáveis e preparadas para os desafios climáticos que já fazem parte do nosso cotidiano.



Por Silvia Helena Ferreira Dias, coordenadora de Operação de Sistemas de Esgotamento e Subprodutos da Sanasa

Manuelito Pereira Magalhães Júnior, diretor-presidente

Marco Antônio dos Santos, diretor técnico

Márcio Luciano G. Barbosa, gerente de Operação de Esgoto

**Correspondem à área das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que abrangem os estados de São Paulo e Minas Gerais.*

Artigo: Água de reúso ganha escala em Campinas e reduz pressão sobre mananciais

Em um contexto de estresse hídrico nas Bacias PCJ e de crescente pressão por eficiência operacional, a EPAR Capivari II (Estação Produtora de Água de Reúso) tornou-se um dos marcos da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A (Sanasa) para integrar segurança hídrica e desempenho ambiental, nascendo de uma lógica simples: em vez de enxergar o efluente tratado como etapa final, elevamos o padrão tecnológico para produzir água de reúso, reduzindo a pressão sobre mananciais e fortalecendo nossa própria política de resiliência climática.

A EPAR Capivari II, projetada com tratamento terciário avançado, é capaz de promover a remoção de nutrientes, microrganismos indicadores e aproximadamente 99% da carga orgânica, expressa em DBO5. Para isso, utiliza a tecnologia MBR/UF (Membrane Biological Bioreactor), combinando reatores biológicos e membranas filtrantes de 0,04 µm.

Operando desde 2011, soma-se a um conjunto de ações como uma solução de gestão de demanda e oferta, ampliando a capacidade de resposta do município em cenários de escassez.

Em 2024, a Sanasa tratou aproximadamente 72 milhões de m³ de esgoto, dos quais 20% foram classificados como água de reúso. Distribuímos mais de 5 mil m³ para diversos setores e utilizamos mais de 64,5 mil m³ de água de reúso em nossos próprios processos, reduzindo o consumo de água potável.

Para nós, o reúso “sai do papel” quando chega às rotinas urbanas e aos nossos próprios processos, funcionando como evidência operacional de que ESG pode ser medido, auditado e entregue.

A Sanasa atingiu a universalização dos serviços de saneamento em 2023, dez anos antes do prazo do Marco Legal, e em 2025 alcançou o primeiro lugar

entre municípios com mais de 500 mil habitantes no Ranking do Saneamento do Instituto Trata Brasil, com notas 10 em todos os quesitos avaliados. Conquistou ainda o Troféu Quíron ESG Platina da ABES, por excelência em gestão, reforçando uma trajetória baseada em investimento, padronização operacional, inovação e governança, e outros prêmios de relevância nacional em gestão e transparência.

E mais, nos últimos cinco anos, além da consolidação da EPAR Capivari II, entrou em operação a EPAR Boa Vista e foi iniciada a conversão da ETE Anhumas – a unidade de maior capacidade instalada do município – para o conceito de EPAR. Com a entrada em operação da EPAR Anhumas, prevista para meados de 2027, a integração das três unidades permitirá que cerca de 53% do esgoto tratado em Campinas passe a ser submetido a tratamento em nível terciário, estabelecendo uma nova marca no setor de saneamento brasileiro, destacando Campinas entre as demais metrópoles.

Frise-se, por fim, que a conversão da ETE Anhumas em EPAR a colocará como o maior polo produtor de água de reúso da América Latina.

Em suma, todas essas ações integram o conjunto de ativos operacionais estratégicos para segurança hídrica e desempenho ambiental em Campinas, com relevância crescente sob cenários de maior variabilidade climática. A adoção de tratamento terciário eleva a confiabilidade do efluente, amplia o potencial de reúso e contribui para a melhoria do corpo receptor, com resultados suportados por indicadores operacionais e por governança orientada à conformidade e à transparência.

Nesse enquadramento, ESG se traduz em evidências verificáveis: esgoto tratado e produção de água de reúso de alto padrão de qualidade, eficiência operacional e continuidade do serviço.

Norma da ANA para reúso não potável de esgoto deve aliviar crise hídrica e **contribuir para universalização**

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) finalizou a etapa de consulta pública sobre o reúso não potável de água de esgoto para o aprimoramento da norma de referência (NR) que ditará as diretrizes da atividade no país. A atividade é uma esperança para enfrentar a crise hídrica, que deve se aprofundar nos próximos anos com os eventos climáticos adversos. Além disso, ela surge como uma opção de novos negócios nos setores de saneamento e sustentabilidade.

A iniciativa da ANA pretende estabelecer regras gerais da política de reúso de água no Brasil, onde é pouco explorado se comparado com outros países. Atualmente, o nível de reúso por aqui é de 1,5% do esgoto tratado, enquanto o nível global é próximo de 11%. Alguns municípios já fazem a utilização de fontes alternativas para descargas sanitárias ou irrigação de jardins, mas falta um regramento válido para todo o território nacional.

A proposta prevê que prestadores de serviços de esgotamento sanitário de um grupo de municípios devem elaborar estudos de viabilidade técnica e econômica para projetos de reúso não potável da água. Estão na lista municípios com histórico de escassez hídrica recorrente ou sazonal.

Em entrevista à Saneas, o coordenador de Regulação de Água e Esgoto da Superintendência de Regulação de Saneamento Básico da ANA, João Geraldo Ferreira Neto, explica como a iniciativa deve uniformizar as normas do setor, melhorar a prestação do serviço e contribuir para a universalização.

Revista Saneas - Qual é o principal objetivo da proposta de norma da ANA para o reúso não potável de água de esgoto e quais lacunas regulatórias ela busca preencher no país?

João Geraldo - O objetivo geral é aumentar o aproveitamento do reúso não potável de água proveniente de efluentes da prestação de serviços públicos de esgotamento sanitário no Brasil. Identificamos a oportunidade de fortalecer a regulação, promovendo a padronização de conceitos e a disseminação de conhecimento sobre reúso não potável, o fortalecimento da segurança jurídica para os modelos de negócio de reúso e a ampliação de incentivos regulatórios e institucionais aplicáveis às atividades de reúso não potável.

Revista Saneas - Como a regulamentação do reúso pode contribuir para ampliar a segurança hídrica no Brasil, especialmente em regiões que enfrentam escassez de água?

João Geraldo - Primeiramente, cabe esclarecer que esta proposta de Norma de Referência não inclui todos os tipos de reúso existentes no Brasil. O reúso considerado aqui é aquele proveniente exclusivamente de Sistemas de Serviços Públicos de Esgotamento Sanitário, não se aplicando ao reúso potável de água, ao reúso interno de água proveniente de águas cinzas nem ao reúso interno de água para fins industriais.

A ampliação da segurança hídrica nos municípios com reúso não potável de água a partir de efluentes da prestação de ser-

viços públicos de esgotamento sanitário se dará com a redução de custos para alcançar mananciais de água ou fontes de abastecimento alternativas de menor qualidade, a menor utilização dos mananciais, a maior resiliência climática, o aumento de práticas sustentáveis, o fortalecimento da economia circular, o aumento de competitividade e inovação em setores que necessitam de uso intensivo de água e o melhor aproveitamento de efluentes tratados que antes eram apenas lançados nos rios.

Revista Saneas - A proposta estabelece diretrizes para diferentes tipos de aplicação do reúso não potável. Quais são os principais usos previstos e quais critérios técnicos devem garantir a segurança dessas práticas?

João Geraldo - Como a ANA não possui atribuição para estabelecer normas ambientais e de saúde pública, não há detalhamento de parâmetros mínimos de qualidade para diferentes tipos de reúso. Conforme a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 54/2005, a minuta de Norma de Referência cita as modalidades de reúso não potável de água proveniente de efluentes da prestação de serviços públicos de esgotamento sanitário para as seguintes finalidades:

a) fins urbanos: lavagem de logradouros e veículos; desobstrução de tubulações; uso na construção civil e em edificações; reserva de proteção contra incêndio; irrigação de parques, campos esportivos, jardins pú-

blicos, escolas e universidades; e utilização em sistemas decorativos aquáticos, como fontes, chafarizes, lagos e espelhos d'água ornamentais;

b) fins agrícolas e florestais: produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;

c) fins ambientais: implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;

d) fins industriais ou minerários: processos, atividades e operações industriais ou minerárias; e

e) fins aquícolas: criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

Na proposta estão estabelecidas as responsabilidades dos agentes envolvidos no processo de reúso, tais como titular, prestador, produtor e distribuidor de água de reúso e usuário. Essas obrigações previstas visam garantir medidas de segurança que evitem riscos à saúde pública, ao meio ambiente e aos trabalhadores envolvidos.

Revista Saneas - De que forma estados, municípios e prestadores de serviços de saneamento deverão se adaptar à futura norma, caso seja aprovada? Haverá um período de transição ou algum apoio técnico da ANA?

João Geraldo - A comprovação da observância e da adoção da Norma de Referência deverá ser realizada pelas entidades reguladoras infranacionais, estaduais,

intermunicipais e municipais, publicando ato normativo contendo os critérios mínimos para seleção de municípios prioritários, conteúdo mínimo dos contratos de fornecimento de água de reúso e contratos de fornecimento de efluentes sanitários, lista de municípios que devem elaborar estudos de viabilidade técnico-econômica para reúso de água, bem como aqueles que estabeleceram metas de reúso de água nos planos de saneamento básico e nos contratos de prestação de serviços de esgotamento sanitário, se houver, e relatórios com o volume anual destinado ao reúso em cada um dos municípios regulados.

A verificação do cumprimento das obrigações decorrentes da Norma de Referência se iniciará a partir de 20 de maio de 2028 e, antes disso, a ANA disponibilizará manual orientativo e curso de capacitação, no formato EaD, gratuito para o público em geral.

Revista Saneas - Quais são os próximos passos após a consulta pública e qual a expectativa da Agência para a consolidação de uma política nacional mais estruturada para o reúso de água no Brasil?

João Geraldo - Com o término da Consulta Pública ANA nº 11/2025 em 13 de março de 2026, elaboraremos relatório de análise das contribuições e a revisão da minuta de

Norma de Referência, com posterior análise jurídica da Procuradoria Federal Especializada junto à ANA, que depois seguirá para deliberação final pela Diretoria Colegiada da ANA. Caso aprovada, essa norma será publicada no segundo semestre de 2026.

Esperamos um aumento do reúso não potável junto com o alcance da meta de universalização de esgotamento sanitário para 90% da população no ano de 2033, considerando a ampliação do tratamento de esgotamento sanitário no Brasil e a necessidade dos setores produtivos de garantir a continuidade do fornecimento de água para suas atividades.



Válvulas de Controle
Ventosas para água e esgoto

EMAIL: CARMEN.GAGO@AQUESTIA.COM
CONTATO: (11) 3782-0255





Foto: Wilson Tadeu

Estudo da Embrapa indica potencial do reúso de esgoto tratado para produção de milho

Pesquisadores da Embrapa Instrumentação identificaram que o uso de efluente de esgoto tratado pode contribuir para a produtividade do milho e para a melhoria das condições do solo. O estudo foi conduzido pelos pesquisadores Wilson Tadeu, Luis Bassoi e pelo doutorando Pedro Abreu, em uma área experimental localizada em São Carlos, no interior de São Paulo.

A pesquisa avaliou o efluente gerado pela Fossa Séptica Biodigestora, tecnologia voltada ao tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais. O experimento analisou o uso desse material na fertirrigação – técnica que combina irrigação e aplicação de nutrientes – comparando diferentes sistemas de manejo, incluindo adubação mineral convencional e aplicação exclusiva do efluente.

Os resultados indicaram que o uso do efluente associado a fertilizantes apresentou produtividade cerca de 16,5% menor que a adubação mineral completa, mas manteve indicadores semelhantes de vigor das plantas. Já a aplicação apenas do efluente chegou a dobrar a produtividade em relação ao cultivo sem adubação, especialmente na segunda safra, período de menor precipitação.

Além dos efeitos na produção, os pesquisadores observaram benefícios para o solo, como redução da acidez e maior ciclagem de carbono. O estudo também apontou que o solo foi capaz de eliminar praticamente todos os coliformes presentes no efluente ao final do ciclo de cultivo, sem evidências de salinização, mesmo após sete anos de aplicação controlada.

Segundo os autores, o reúso de efluentes tratados pode representar uma alternativa sustentável para o aproveitamento de água e nutrientes na agricultura, sobretudo em regiões com escassez hídrica e em sistemas produtivos que buscam reduzir custos com fertilizantes.



O papel da pesquisa no avanço do reúso de água

“A aproximação entre universidades e empresas é decisiva porque o reúso de água não se consolida apenas como tema tecnológico; ele precisa ser tratado como agenda de segurança hídrica, planejamento territorial, regulação e operação em escala real. A universidade produz conhecimento, valida metodologias, gera evidências e desenvolve parâmetros técnicos. Já as companhias de saneamento conhecem as restrições operacionais, os custos, os riscos, a aceitação social e a viabilidade de implantação”. Quem afirma é Ester Feche Guimarães, diretora Socioambiental e Cultural da AESabesp e coordenadora do 2º Encontro das Universidades, realizado durante o 36º Encontro Técnico AESabesp/Fenasan 2025. Do passado mesmo ou deste ano – embora relembre no final que o debate sobre o tema ocorreu na edição passada

De acordo com a diretora, quando esses dois mundos trabalham de forma integrada, o reúso deixa de ser experiência isolada e passa a reunir os elementos necessários para virar política pública estruturante: base técnica consistente, modelo operacional, governança regulatória, indicadores de de-

sempenho e capacidade de replicação. “É justamente essa ponte que permite transformar pesquisa em norma, projeto-piloto em referência institucional e inovação em solução efetiva para enfrentar a escassez hídrica”, garante.

Outro ponto central é alinhar as agendas de pesquisa às demandas reais da operação: “Esse alinhamento exige que a pesquisa parta de problemas concretos da operação. A agenda de pesquisa precisa dialogar com dados reais das companhias, com prioridades regulatórias, com metas de universalização e com os desafios trazidos pelas mudanças climáticas. Isso inclui testes em escala aplicável, avaliação de custo-benefício, critérios de monitoramento, análise de risco, viabilidade jurídica e regulatória e definição clara de indicadores para tomada de decisão pública”, explica.

Para Ester Feche, não basta produzir conhecimento de excelência: “É preciso produzir conhecimento utilizável. A boa pesquisa para o setor de saneamento é aquela que ajuda a decidir, priorizar investimento, reduzir risco e orientar política pública. Por isso, a aproximação com as operadoras,

com o poder público e com os órgãos reguladores é essencial desde a formulação das perguntas de pesquisa”.

A especialista explica ainda que, sem essa ponte entre ciência e operação, o país corre o risco de continuar reagindo às crises hídricas de forma fragmentada e emergencial. Para ela, o fortalecimento dessa articulação é essencial para transformar conhecimento em capacidade institucional, ampliar a resiliência dos sistemas de abastecimento e incorporar o reúso de água às estratégias de segurança hídrica e adaptação climática.

Este debate também esteve presente no 2º Encontro das Universidades, realizado durante o 36º Encontro Técnico AESabesp/Fenasan 2025, que dedicou um painel ao tema “Reúso Urbano e Circularidade nos sistemas de água e saneamento”. O encontro reuniu pesquisadores, reguladores e operadoras para discutir caminhos institucionais e tecnológicos para ampliar o reúso no país. Um dos destaques foi a presença do professor Francis Lajara De Los Reyes III, da Universidade Estadual da Carolina do Norte (EUA), que apresentou avanços no reúso da água para uso humano no país.



**Encontro Técnico
AESABESP**
Congresso Nacional
de Saneamento e
Meio Ambiente



FENASAN
Feira Nacional
de Saneamento e
Meio Ambiente

EM 2026, O SANEAMENTO TERÁ NOVAMENTE SEU GRANDE PONTO DE ENCONTRO

20 a 22 de outubro de 2026 · Expo Center Norte · São Paulo/SP

Se a última edição da Encontro Técnico AESabesp e da Fenasan foi inesquecível, prepare-se para uma experiência ainda maior.

Em 2026, traremos mais inovação e tecnologia, conexões e conteúdo para o setor. Agende-se para participar do maior ponto de encontro do saneamento ambiental das Américas!

Mais informações:
www.fenasan.com.br

REALIZAÇÃO:



De um país sem saneamento à construção da identidade do setor

Em meio às transformações do saneamento brasileiro nos anos 1980, profissionais se uniram para criar a Associação dos Engenheiros da Sabesp e fortalecer o debate técnico na área

A história do saneamento no Brasil começa a ganhar corpo no século 19. Ao contrário do período colonial, quando o abastecimento de água e a coleta de esgoto ocorriam de forma individualizada, governos e agentes privados iniciaram o movimento de sanear as cidades. Isso ocorre especialmente pelo aumento de epidemias e pela disseminação das doutrinas higienistas e sanitaristas. O país lançou uma legislação que direcionava formas de moradias e códigos sanitários, a fim de banir habitações insalubres, como os cortiços e estalagens.

Grande parte dos serviços de esgoto era concedida a empresas de fora do país, como a Companhia City, de origem inglesa, que operou os esgotos do Rio de Janeiro até o início do século 20. Já no abastecimento de água, o protagonismo ficou com empresas privadas nacionais, como a Companhia Cantareira de São Paulo. No entanto, a cobertura era baixa, na casa de 10% a 15% até o início da década de 1930, sendo restrita às grandes cidades.

Com a expansão urbana que se seguiu nos anos seguintes, estados e municípios começaram a criar repartições e inspetorias responsáveis pelos serviços e pelas obras



Trio de pioneiros da AESabesp:
Plínio Montoro, Paulo Ferreira e Ivan Borghi



Primeira sede da AESabesp (1988)

1986

1987

que a nova infraestrutura exigia. O investimento de recursos do poder público elevou a cobertura do abastecimento de água a 40% nas principais cidades do país.

O ano de 1953 foi marcado pelo primeiro Plano Nacional de Financiamento para Abastecimento de Água, influenciado pela modernização das obras de engenharia. O projeto ajudou a municipalizar o saneamento no modelo de autarquias ou empresas de economia mista. Logo depois, foi implementada a sustentação tarifária do setor.

O índice de cobertura dos serviços de abastecimento chegou a 50% da população na década de 1960, mesma época em que foi criado o Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS), que se tornou a principal fonte de financiamento do saneamento. Em 1971, mais um projeto do governo federal ganhou corpo: o Planasa (Plano Nacional de Saneamento) centralizou a política do setor e promoveu a criação das companhias estaduais de saneamento, como a Sabesp, fundada em 1973. O abastecimento de água alcançou 90% na década de 1980, mas o esgotamento sanitário não chegou a 50%.

O surgimento da AESabesp

Os anos 1980 foram cruciais para a criação da AESabesp. Em 1986, o Banco Nacional de Habitação foi encerrado, passando toda a gestão do sistema financeiro para a Caixa Econômica Federal. Nesse momento, o setor passou a enfrentar falta de financiamento e deixou de contar com um planejamento federal.

O engenheiro civil, mestre e doutor Paulo Ferreira acompanhava a situação de mudanças e incertezas, o que acabou levando à fundação da AESabesp. “O modelo do saneamento brasileiro passava por grandes mudanças e o país retomava a democracia. Na Sabesp, consciente do seu grande compromisso social e com a saúde pública, havia preocupações com o futuro do setor, mas também muita vontade de preservar o conhecimento técnico e manter os profissionais unidos em torno de um objetivo comum: fortalecer o saneamento e o seu corpo técnico”, recorda.



Associados frequentando a sede da AESabesp



Primeira Fenasan na Costa Carvalho (1990)

Ferreira integrou o grupo fundador da AESabesp e foi o primeiro presidente da instituição, segundo ele, criada sem vínculos de natureza ideológica, partidária ou sindical e constituída por pessoas comprometidas com a saúde pública, o desenvolvimento profissional e a integração de associados por meio de cursos técnicos, eventos culturais e esportivos e, principalmente, com o resgate da valorização das profissões técnicas perante as discussões políticas.

Assim, entre as décadas de 1980 e 1990, a entidade atuou em meio a um período desafiador, marcado por instabilidade política e econômica, além de poucas condições de investimento por parte das empresas. “Ainda assim, a recém-fundada AESabesp procurou manter viva a troca de experiências e o debate técnico de alto nível, representando um ponto de apoio para os profissionais do setor tanto na Sabesp como na iniciativa privada, em meio às transformações que o país vivia”, conta Ferreira.

Essa visão permitiu a realização de encontros, debates, capacitações e exposições de trabalhos que aproximavam ideias e empreendedores. “Foi o embrião da hoje extraordinária Fenasan, que se tornou o maior e mais qualificado fórum de difusão técnica atualizada e inovadora e, também, um veículo importante de integração entre empresas, fornecedores, comunidade acadêmica, sociedade e de troca de experiências para todo o setor”, avalia.

Moldando a identidade do saneamento

O aprendizado coletivo e a integração entre os vários agentes do setor foram essenciais na construção de uma identidade profissional forte no saneamento. “Houve uma evolução importante na abertura de canais entre o corpo técnico e a diretoria da Sabesp, um grande avanço na integração entre os colaboradores das diversas áreas, e uma redução significativa de indicações de cunho político, valorizando a competência técnica”, relembra o primeiro presidente da AESabesp.

Essa evolução na troca de competências entre as companhias e na qualidade dos serviços transformou essas trocas em conhecimento compartilhado para todo o setor, como se percebe no lançamento das Proposições

Básicas para a Sabesp, documento que previa a reestruturação, descentralização, desburocratização e agilização da empresa; a política de adequação e valorização do recurso humano; a revisão da política tarifária; e a revisão dos planos de investimento e a consequente readequação orçamentária.

“No período de 1995 a 2000, fiel aos princípios elencados pela AESabesp em 1986, a Sabesp desenvolveu um grande plano de reestruturação que se tornou a base fundamental para tornar-se a grande empresa de saneamento da comunidade paulista”, avalia Paulo Ferreira, que destaca o espírito de união e companheirismo nas administrações da associação, mantendo o foco técnico e nas pessoas. Esse espírito colaborativo, de acordo com ele, foi o que capacitou a instituição a desenvolver uma base sólida de compromissos com o saneamento e explica sua relevância até hoje.

Mais 40 anos de desafios pela frente

Atual presidente da AESabesp, Agostinho Geraldês diz que os 40 anos da entidade são celebrados por terem consolidado a entidade técnica como uma instituição de grande relevância no saneamento, contribuindo para o desenvolvimento e a valorização dos profissionais que atuam no setor.

“Mais do que uma associação, a AESabesp se tornou um espaço de troca de conhecimento, inovação e debate qualificado sobre os desafios do saneamento no Brasil. São quatro décadas dedicadas a fortalecer o setor, promover capacitação técnica e aproximar profissionais, empresas, academia e poder público em torno de um objetivo comum: ampliar o acesso ao saneamento e melhorar a qualidade de vida da população”, avalia em retrospecto.

Geraldês cita ainda avanços significativos alavancados pela disseminação de conhecimento técnico, pela capacitação de profissionais e pela promoção de debates qualificados sobre políticas públicas e inovação no setor. “Eventos técnicos, congressos e programas de capacitação promovidos pela associação ajudaram a formar gerações de profissionais e a difundir boas práticas em abastecimento de água, esgotamento sa-



aesabesp

...



Fenasan, 36 anos depois, consolida sucesso entre visitantes e expositores.



aesabesp

...



Agostinho Geraldês, presidente da AESabesp, durante a abertura do 36º Encontro Técnico.

nitário e gestão ambiental. Além disso, a entidade sempre atuou como um ponto de convergência entre diferentes atores do setor, fortalecendo o diálogo e estimulando soluções mais eficientes para os desafios do saneamento”, completa.

O grande exemplo, segundo ele, foi a última edição do Encontro Técnico e da Fenasan, em que quase 38.500 visitantes da feira, mais de 1 mil congressistas e 412 expositores de todo o Brasil e também do exterior se reuniram em uma área de 40 mil metros quadrados.

O prestígio desses eventos fortalece o reconhecimento que a associação busca, como explica o presidente: “A AESabesp quer ser reconhecida como uma instituição técnica, comprometida com o desenvolvimento sustentável do saneamento e com o interesse público. Hoje, mais do que uma associação profissional, somos um espaço de convergência entre conhecimento técnico, inovação e políticas públicas. Nossa

missão é aproximar profissionais, empresas, academia e gestores públicos para discutir soluções que impactam diretamente a qualidade de vida da população. Queremos que a sociedade enxergue a AESabesp como uma entidade que trabalha para fortalecer o saneamento como um dos pilares da saúde pública, da preservação ambiental e do desenvolvimento econômico do país”.

Para os próximos 40 anos, Agostinho Geraldês elege como maior desafio contribuir para que o Brasil alcance a universalização do saneamento, já que ainda há milhões de brasileiros sem acesso pleno à coleta e ao tratamento de esgoto e ao abastecimento de água de qualidade. “Nos próximos anos, também teremos desafios importantes relacionados às mudanças climáticas, à segurança hídrica, à eficiência energética e à necessidade de incorporar novas tecnologias à gestão dos sistemas de saneamento”, conclui.

Por
Wellington Corrêa



Wellington Corrêa
Supervisor de Segurança do
Trabalho e Meio Ambiente da
GBMX

Graduado em Engenharia Ambiental, com pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UNICAMP, atua na GBMX desde 2011, atualmente como supervisor da Segurança do Trabalho e Meio Ambiente.



Aterro Zero transforma **gestão ambiental** em cultura na GBMX



A gestão de resíduos nas indústrias vem passando por mudanças significativas nos últimos anos. Mais do que cumprir exigências legais, muitas empresas têm buscado integrar sustentabilidade às suas estratégias de negócio. Na GBMX, essa transformação ganhou forma com a implantação do projeto Aterro Zero, uma iniciativa que vai além da gestão convencional de resíduos e promove uma mudança cultural dentro da organização.

O projeto traduz o compromisso da GBMX com a sustentabilidade, em ações concretas e mensuráveis, alinhadas aos princípios da economia circular. Ao eliminar o envio de resíduos para aterros sanitários, a empresa adota uma abordagem sistêmica de gestão de resíduos, mapeando todo o ciclo produtivo — desde o recebimento das matérias-primas até a destinação final — e promove a integração entre áreas-chave como Engenharia, Materiais, Manufatura, Compras e Meio Ambiente.

Um dos pilares do projeto é atuar diretamente na origem da geração de resíduos. Para isso, a empresa passou a investir no redesenho de produtos e processos produtivos, com foco na prevenção. Um exemplo dessa mudança está na adoção de peças fundidas que substituem etapas de soldagem durante a montagem. A alteração reduziu o consumo de insumos, simplificou o processo produtivo e diminuiu as perdas de material, contribuindo para maior eficiência operacional e menor impacto ambiental.

Outro avanço importante ocorreu na gestão de solventes utilizados na produção. A empresa implantou uma recuperadora de solventes, incorporando, na prática, o conceito de economia circular. Com essa tecnologia, parte significativa do material utilizado no processo de limpeza industrial é regenerada e reaproveitada. Atualmente, o índice de recuperação ultrapassa 68%, permitindo que o solvente volte ao processo produtivo. Já o resíduo restante é destinado à indústria de tintas, evitando o descarte e fortalecendo uma cadeia produtiva mais sustentável. Em 2025, 14.180 litros de solvente usados foram enviados para recupe-

ração. Desse volume, 9.720 litros foram reprocessados e reutilizados, resultado que superou a meta inicial de reaproveitamento estabelecida pela empresa.

A implantação de novos equipamentos e a reorganização da central de resíduos permitiram aprimorar o processo de segregação e valorização de materiais. Com isso, resíduos que antes não tinham destinação adequada passaram a ser identificados e encaminhados para coprocessamento ou compostagem, reduzindo significativamente o volume enviado para aterros sanitários. Além dos benefícios ambientais, a mudança também gerou redução de custos associados ao transporte e descarte de resíduos.

Outro ponto importante da estratégia ambiental da empresa é a destinação da sucata de aço gerada em seu processo produtivo. Todo o material é encaminhado para reciclagem, retornando ao ciclo industrial como matéria-prima para novos produtos. Nos últimos dois anos, aproximadamente 5 mil toneladas de sucata de aço foram comercializadas para reciclagem. A medida evita o descarte convencional de resíduos e contribui para fortalecer a economia circular, além de gerar retorno financeiro para a empresa.

Em 2023, cerca de 133 toneladas de resíduos ainda eram destinadas a aterros sanitários. A partir de estratégias voltadas à redução, segregação e valorização de materiais, esse volume foi gradualmente eliminado. Em novembro de 2024, a empresa atingiu oficialmente o objetivo do projeto: nenhum resíduo industrial passou a ser enviado para aterros sanitários. Todos os materiais passaram a receber destinação alternativa, como coprocessamento ou compostagem, consolidando o modelo de Aterro Zero na operação.

A experiência da GBMX mostra que iniciativas ambientais podem gerar benefícios que vão além da preservação do meio ambiente. A combinação entre inovação tecnológica, reengenharia de processos e mobilização interna resultou em ganhos operacionais, redução de custos e fortalecimento da reputação institucional. 

Débora Beatriz Maia Vidotti

Graduação em Engenharia Civil pela Unicesumar. Especialista em gerenciamento de projetos pela Universidade Estadual de Maringá. Mestre em Engenharia Urbana pela Universidade Estadual de Maringá.

Paulo Fernandes Soares

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Maringá, mestrado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo. Professor do departamento de pós graduação em Engenharia Urbana da Universidade Estadual de Maringá.

Juliana Azoia Lukiantchuk

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Maringá, Mestrado e Doutorado em Geotecnia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professora do departamento de pós graduação em Engenharia civil da Universidade Estadual de Maringá.

Cláudia Telles Benatti

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Maringá, mestrado e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá. Professora do departamento de Engenharia civil da Universidade Estadual de Maringá.

Um modelo qualitativo de avaliação de risco para o reúso de água: riscos relacionados à irrigação agrícola no Brasil

Resumo

A escassez hídrica global afeta 32,5% da população urbana e está em crescimento. O reúso de água é fundamental para mitigar essa escassez, embora envolva riscos devido à presença de contaminantes. Estudos de análise de risco são cruciais para avaliar as fontes de contaminação, vias e cenários de exposição nas práticas de reúso. Dentre as metodologias disponíveis, a análise qualitativa é recomendada para o reúso de água não potável devido às incertezas e diversidade de fatores envolvidos. Este trabalho apresenta uma metodologia qualitativa para análise de risco, considerando categorias de reúso de água não potável. São avaliados fatores que afetam a saúde humana e o ambiente, considerando cenários de exposição, características dos receptores e fontes da água reutilizada. A análise focou no reúso agrícola, com alternativas de irrigação de soja e cana-de-açúcar. A partir da revisão bibliográfica, foram identificadas e classificadas a probabilidade de ocorrência e a magnitude do impacto dos fatores de risco, utilizando uma escala numérica relativa. Os resultados indicam um modelo promissor de análise de risco, ajustável a diferentes modalidades de reúso e fatores-chave, com foco em métodos de tratamento da água e propostas de medidas de controle de risco.

PALAVRAS-CHAVE: Reúso de água, Avaliação de risco, Análise qualitativa.

Introdução

De acordo com o Relatório de Riscos Globais do Fórum Econômico Mundial (FEM) (2023), os dez principais riscos globais de curto e longo prazo estão principalmente relacionados a crises de recursos naturais, mudanças climáticas e outros desafios ambientais (FEM,

2023). Como resultado da distribuição global espaço-temporal desigual, 2,3 bilhões de pessoas vivem em países com escassez hídrica, das quais 733 milhões vivem em países com alta e crítica escassez hídrica (ONU-Água, 2021). A crescente demanda por água, proveniente de economias em rápido desenvolvimento e de populações concentradas, exerce pressão sobre a água disponível (Wang et al., 2019).

Para abordar os problemas urgentes do mundo e se preparar para os desafios do próximo século, a Agenda 21 foi desenvolvida na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), realizada no Rio de Janeiro em junho de 1992 (Cúpula do Rio). Ela se concentrou especificamente em abordagens integradas para o desenvolvimento, a gestão e o uso da água. Em relação aos recursos hídricos, alguns de seus pedidos aos governos foram para que estruturassem suas próprias agendas locais a fim de desenvolver novas e alternativas fontes de abastecimento de água, como o reúso e a reciclagem de águas residuais, entre outras opções (UNCED, 1992). Tanto o reúso quanto a reciclagem de águas residuais são considerados componentes-chave na redução da poluição hídrica e da escassez global de água doce (metas 6.3 e 6.4 dos ODS) (ONU, 2015).

O reúso da água é compatível com o conceito de economia circular e constitui uma estratégia importante para aliviar os impactos adversos das pressões excessivas sobre os recursos hídricos (Tzanakakis et al., 2023; Voulvoulis, 2018). O tratamento e o reúso de águas residuais desempenham um papel importante no planejamento urbano (Angelakis et al., 2018). O reúso de águas residuais alivia a pressão sobre as fontes de água doce, garantindo a qualidade e a quantidade de água necessária para diversos usos, reduz

os conflitos pelo uso da água e contribui para o desenvolvimento socioeconômico (Angelakis et al., 2018; Santos et al., 2021; Santos e Lima, 2022)

Embora a prática do reúso de água exista desde a pré-história, as primeiras regulamentações só surgiram em 1918, quando o estado da Califórnia, nos EUA, estabeleceu uma legislação para regular o reúso de água (Angelakis et al., 2018; DWA, 2019). Em escala global, as primeiras diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre o reúso de água foram estabelecidas em 1973, com foco no reúso agrícola, servindo de base para outros países (Shoushtarian e Negahban-Azar, 2020). As regulamentações sobre o reúso de água variam significativamente em todo o mundo atualmente (Partyka e Bond, 2022; Shoushtarian e Negahban-Azar, 2020). Além disso, o conceito de abordagem “adequada à finalidade” envolve o estabelecimento de níveis de tratamento e o estabelecimento de metas de qualidade da água. Considera as necessidades dos usuários finais para minimizar os altos custos de implementação de tecnologias avançadas de tratamento de água e os requisitos energéticos (Helmecke et al., 2020). Em geral, as regulamentações existentes não abrangem todos os tipos de reúso de água ou todos os parâmetros de qualidade necessários para garantir a segurança dos usuários e trabalhadores (Chhipi-Shrestha et al., 2017; Comissão Europeia, 2016; Rebelo et al., 2020; Rock et al., 2019).

Além da não homogeneidade nas regulamentações de reúso de água, a falta de confiança social e a alta complexidade da governança em técnicas e práticas de reúso de água dificultam sua implementação global sistemática, apesar de seus inúmeros benefícios e inúmeros estudos de caso bem-sucedidos em todo o mundo (Radini et al., 2023). A avaliação de aplicações de reúso de água envolve a ponderação de alternativas e a seleção da aplicação de reúso de água mais adequada (Pan et al., 2018). A avaliação consiste na análise de diversos critérios relacionados aos sistemas de reúso de água, que geralmente variam em cada caso. Os critérios que podem ser utilizados incluem política, economia, aspectos sociais, tecnologia, legislação, meio ambiente, qualidade da água, aceitação pública, economia de água doce, custo do ciclo de vida, riscos à saúde humana e riscos ao meio ambiente (Asano, 2007; Chen et al., 2014; Garfi e Ferrer-Martí, 2011; Lee e Jepson, 2020; Malinowski, 2006; Savun-Hekimoğlu et al., 2021; Thao, 2018). Os autores também enfatizam a análise de risco como um critério essencial e determinante para a decisão de reutilização da água, minimizando riscos e aumentando a confiança pública (Amoueyan et al., 2019; Dominguez-Chicas e Scrimshaw, 2010; Guo et

al., 2021; Müller et al., 2020). Os modelos de análise de risco são ferramentas de apoio à decisão que devem ser adequadamente projetadas e utilizadas com cuidado para alcançar resultados bem-sucedidos (Capodaglio et al., 2014).

Com a crescente demanda por fontes alternativas para lidar com a deficiência hídrica em diversos setores, há uma necessidade urgente de estabelecer abordagens metodológicas que permitam a avaliação de diversas possibilidades de reúso seguro da água. Metodologias de tomada de decisão baseadas em avaliações de risco podem ser a chave para a segurança do meio ambiente e a proteção da saúde pública ao utilizar água de reúso (Radini et al., 2023). Diversas abordagens de avaliação de risco podem atender a diferentes necessidades de gestão (OMS, 2016). Os riscos podem ser avaliados quantitativa e/ou qualitativamente. Dados qualitativos e numéricos são apropriados, e um não deve necessariamente ser mais valorizado do que o outro. No entanto, nos casos em que os dados ainda não estão disponíveis para fundamentar uma avaliação quantitativa de risco, uma abordagem qualitativa pode ser adotada (DEFRA, 2011). Portanto, este estudo visa desenvolver uma metodologia de análise qualitativa de risco que possa ser aplicada em diversos cenários para avaliar diferentes categorias de reúso de água não potável (agrícola, industrial, municipal ou ambiental), considerando os fatores de risco para a saúde humana e o meio ambiente.

Apesar de possuir uma vasta rede hidrográfica, responsável por aproximadamente 12% do abastecimento mundial de água, o Brasil tem enfrentado problemas de escassez hídrica em diversas regiões nos últimos anos devido a secas prolongadas. Isso tem tido efeitos prejudiciais na geração de energia, na produção agrícola e no abastecimento urbano de água potável (IANAS, 2019; Santos et al., 2021), destacando a crescente escassez hídrica observada globalmente (Getirana et al., 2021). Estima-se que o consumo de água no Brasil aumentará 24% até 2030 em comparação com o volume atual. Esse aumento é atribuído ao processo de urbanização, bem como à expansão da indústria, agroindústria e economia (IANAS, 2019). Atualmente, o maior consumo de água no Brasil é atribuído à irrigação (68%), uso animal (10%), indústria (8,8%) e abastecimento urbano (8,6%) (ANA, 2023). Portanto, a abordagem desenvolvida foi aplicada para estabelecer o nível de risco apropriado para irrigação agrícola no sul do Brasil utilizando água de reúso. Para ilustrar a aplicação da metodologia e seu potencial em pesquisas emergentes e agendas políticas, duas culturas importantes foram selecionadas para a construção de cenários de risco: a irrigação de culturas de soja e a irrigação de culturas de cana-de-açúcar.

Objetivos

Este estudo tem como objetivo desenvolver uma metodologia qualitativa de análise de risco aplicável a diferentes cenários de reúso de água não potável (agrícola, industrial, municipal ou ambiental), considerando os fatores de risco à saúde humana e ao meio ambiente.

Metodologia

Identificação dos fatores de risco

Uma ferramenta importante para a análise de riscos é a norma ISO 31000:2018, que estabelece que o processo de avaliação de riscos compreende as etapas de identificação, análise, avaliação e tratamento de riscos (ISO, 2018). A metodologia deste artigo utilizou as etapas recomendadas pela ISO 31000:2018.

As alternativas para o reúso de água e seus fatores de risco associados foram identificados por meio de uma revisão bibliográfica de estudos recuperados das bases de dados Google Scholar, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Scopus e Web of Science. O período foi definido para todos os anos. O termo de busca utilizado foi: “reclaimed water” (água recuperada), “recycled water” (água reciclada), “water reuse” (reúso de água), “wastewater reuse” (reúso de águas residuais), “water-recycling” (reciclagem de água), “waste water recycling” (reciclagem de águas residuais), além de “risk analysis” (análise de risco), “risk assessment” (avaliação de risco), “qualitative risk analysis” (análise qualitativa de risco) e “qualitative risk assessment” (avaliação qualitativa de risco). O idioma utilizado foi o inglês. Devido à alta demanda e à importância do uso da água para fins agrícolas (SNIS, 2022), os riscos relacionados a esse tipo de reúso de água foram avaliados.

Foram avaliados os riscos à saúde e ao meio ambiente, identificando os principais fatores de risco para o tipo de uso analisado em cada cenário de exposição, considerando os riscos diretos e indiretos que a água de reúso pode representar (Deng et al., 2019). Os riscos à saúde considerados incluíram aqueles relacionados aos receptores humanos, abrangendo trabalhadores em áreas onde a água de reúso é utilizada, consumidores de culturas agrícolas e a população que utiliza áreas onde a água de reúso é aplicada. Quanto aos riscos ambientais, os receptores considerados foram o aquífero subterrâneo e o solo. Foram analisados os fatores de risco relacionados à probabilidade de ocorrência (PO) e à magnitude do impacto (MI) dos riscos associados à água de reúso. PO refere-se à frequência de ocorrência de contaminantes na água de reúso, enquanto MI refere-se à magnitude na qual um efeito direto pode ser detectado em receptores, como humanos e o meio ambiente.

Uma análise qualitativa de risco foi empregada na análise, dada a falta de dados específicos para uma abordagem quantitativa, como rotas de exposição, volume e frequência de exposição (Rebello et al., 2020). No entanto, a abordagem qualitativa não deve ser utilizada para a análise de risco do reúso de água para fins de consumo. Para prever e modelar possíveis cenários de exposição de alto risco, como o reúso de água potável durante diversas condições operacionais, avaliar a segurança de um esquema de reúso, determinar o tratamento necessário ou testar cenários alternativos de reúso, avaliações quantitativas de risco microbiano são comumente realizadas (Zhiteneva et al., 2020). Portanto, a análise limitou-se à análise de risco do reúso de água para fins não potáveis, tendo como fonte o efluente de estações centralizadas de tratamento de águas residuais.

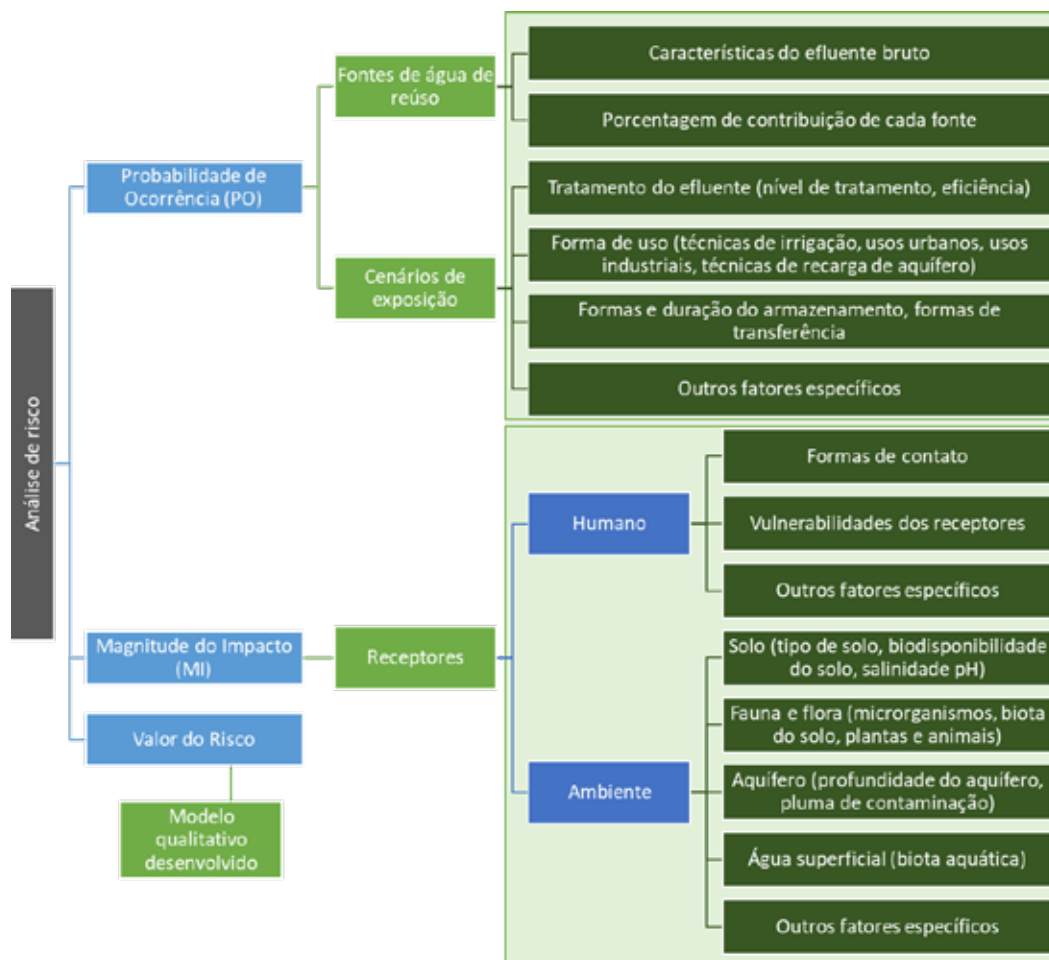
Desenvolvimento do modelo de análise de risco

Para a elaboração do modelo de avaliação de risco, foi adotado o modelo fontes–cenários de exposição–receptores, conforme proposto por Revitt et al. (2021). Nesse modelo, os principais fatores de risco são identificados dentro de cada cenário de exposição e para cada receptor. Em seguida, avaliam-se a PO e MI de cada fator de risco.

A figura 1 apresenta uma representação do modelo fontes–cenários de exposição–receptores utilizado na análise de risco, indicando os fatores de risco analisados nas diferentes categorias de reúso. O modelo possibilita entender a natureza do risco, suas características e o nível do risco.

A PO e a MI foram avaliados utilizando o modelo proposto por Revitt et al. (2021), que utilizou uma escala numérica com valores predefinidos variando de 1 (menor probabilidade/impacto) a 4 (maior probabilidade/impacto) para análise fatorial. A avaliação da probabilidade de ocorrência de um risco utilizou a seguinte pontuação: 1, raro; 2, improvável; 3, possível; 4, provável. Na pontuação do impacto, o resultado esperado do risco é classificado como: 1, muito baixo; 2, baixo; 3, médio; 4, alto. A PO foi determinada por meio da análise de cenários de exposição, avaliando a probabilidade de identificação de contaminantes na água de reúso, a origem da água de reúso e seu uso pretendido. Neste artigo, os fatores de risco utilizados para a análise incluíram a fonte da água de reúso e o tipo de tratamento. Cada fator de risco foi analisado com base em dados da literatura e atribuído de acordo, fornecendo uma estrutura abrangente para avaliar os riscos potenciais associados ao reúso da água.

Figura 1 - Fluxograma do processo de análise de risco qualitativa – modelo fontes-cenário de exposição-receptores



Fonte: A autora, 2023.

Efluentes de residências rurais e urbanas podem conter contaminantes provenientes de diversas atividades, como lavagem de roupas, descarte inadequado de itens não utilizados, como medicamentos e produtos químicos, e excreções (Fairbairn et al., 2016; Revitt et al., 2021). No entanto, o volume gerado em áreas rurais é menor. Portanto, foi atribuído o valor 1 ao esgoto de áreas rurais (de ocorrência rara devido à falta de evidências) e 2 ao esgoto de áreas urbanas (improvável, mas com ocorrência conhecida). Áreas industriais e hospitais são as principais fontes de contaminantes emergente (CEs), especialmente quando não há tratamento no local (Fairbairn et al., 2016). Como resultado, foi utilizado o valor 3 para essa fonte quando há tratamento no local (possível de ocorrer) e o valor 4 quando não há tratamento (provável de ocorrer).

Os contaminantes podem ser degradados durante o armazena-

mento e o transporte; No entanto, também podem gerar subprodutos tóxicos. Segundo Revitt et al. (2021), a falta de informações sobre o comportamento de contaminantes

durante o armazenamento e a distribuição pode levar a discrepâncias nos dados. Portanto, o armazenamento e a distribuição de água de reúso não foram avaliados neste estudo.

Considerando os métodos de tratamento típicos utilizados em estações de tratamento de águas residuais centralizadas e avaliando suas eficiências, particularmente na remoção de matéria orgânica e contaminantes emergentes, foram estabelecidos critérios para cada tipo de tratamento para avaliar a PO de riscos relacionados à saúde e ao ambiente, categorizando-os com base em sua eficiência de tratamento. O tipo de tratamento aplicado à produção de água de reúso foi associado à seguinte pontuação:

Tabela 1 – Fatores que influenciam a determinação da magnitude de impacto

Receptores	Fator de risco	Possíveis cenários	Magnitude de impacto	Valor associado ao fator
Saúde humana	Presença de E. coli	E. coli $\geq 10^3$ CFU/ 100 mL	Alto	4
		$10^2 < \text{E. coli} \leq 10^3$ CFU/100 mL	Médio	3
		$10^1 < \text{E. coli} \leq 10^2$ CFU/100 mL	Baixo	2
		E. coli $\leq 10^1$ CFU/ 100 mL	Muito baixo	1
	Forma de contato	Ingestão acidental da água de reúso	Alto	4
		Ingestão de alimentos em contato com água de reúso	Médio	3
		Inalação de aerossóis	Baixo	2
		Adsorção dérmica	Muito baixo	1
Ambiente	Presença de CEs	CE ≥ 1.000 ng L ⁻¹	Alto	4
		CE entre 500 e 1.000 ng L ⁻¹	Médio	3
		CE entre 100 e 500 ng L ⁻¹	Baixo	2
		CE ≤ 100 ng L ⁻¹	Muito baixo	1
	Tipo de solo	Areia bem selecionada e limpa, variando a areia grossa com cascalho	Alto	4
		Areia fina ou silte argiloso ou solo arenoso com humos e turfas variando a solos constituídos predominantemente de areia e silte	Médio	3
		Argila arenosa e/ou siltosa, variando a areia argilosa ou silte argiloso de cor amarela, vermelha ou marrom	Médio	3
		Argila de cor amarela, vermelha ou marrom mediantemente compacta, variando a argila pouco siltosa e/ou arenosa	Baixo	2
		Rocha, argila compacta de cor branca, cinza ou preta, variando a rocha alterada e argila mediantemente compacta de cor avermelhada	Muito baixo	1
	Profundidade do nível de água	Profundidade do nível de água < 2 m	Alto	4
		Profundidade do nível de água < 4 m	Médio	3
		Profundidade do nível de água > 5 m	Baixo	2
		Profundidade do nível de água > 10 m	Muito baixo	1

Fonte: A autora, 2023.

tratamento terciário, 1 (raro); lodos ativados e reatores anaeróbios, 2 (improvável); tratamento químico e biológico, 3 (possível); tratamento em lagoas de estabilização, 4 (provável).

A definição de MI foi realizada analisando separadamente o risco à saúde humana e ao ambiente, avaliando a presença potencial de contaminantes na água de reúso e a forma de contato entre a água de reúso e os receptores. A Tabela 1 apresenta como os fatores que influenciam a MI em diferentes cenários podem ser pontuados de acordo com os dados disponíveis sobre as vias de

exposição relacionadas.

Escherichia coli (E. coli) é o indicador mais comum usado para avaliar os riscos associados à saúde humana (Chhipi-Shrestha et al., 2017; Lima et al., 2022; Truchado et al., 2021; Zhiteneva et al., 2020). No estudo atual, a estimativa da MI na saúde humana foi associada à qualidade da água de reúso, considerando o padrão de E. coli, de acordo com as tecnologias e sistemas de tratamento utilizados durante sua produção. A qualidade da água foi categorizada em quatro classes, com base nas normas atuais

da União Europeia para águas residuais recuperadas para irrigação (CE - Comunidade Europeia, 2020). O nível de impacto na saúde humana associado a cada classe de qualidade foi determinado com base na classificação proposta por (Rebello et al., 2020), que correlaciona a classificação de perigo com a qualidade da água de reuso de acordo com o nível de tratamento das águas residuais.

Os CEs são de particular interesse na análise de risco ambiental devido à ausência de legislação específica que delimite os limites de concentração e a capacidade de bioacumulação (Alawi et al., 2018; Revitt et al., 2021). Os CEs compreendem uma vasta gama de substâncias naturais e antropogênicas, como produtos farmacêuticos, compostos desreguladores endócrinos, retardantes de chama, incluindo retardantes de chama bromados (BFRs) e perfluoroquímicos (PFCs), microplásticos, nanomateriais e toxinas de algas que só recentemente foram reconhecidas como amplamente presentes no meio ambiente e potencialmente perigosas (Necibi et al., 2021; Valbonesi et al., 2021). A Diretiva 2013/39/UE (CE - Comunidade Europeia, 2013) estabeleceu um quadro para a ação comunitária no domínio da política hídrica e uma estratégia contra a poluição da água, e deu um passo em frente ao propor uma primeira Lista de Vigilância como uma diretriz de substâncias para as quais os dados de monitorização a nível da União precisam de ser recolhidos com o objetivo de apoiar futuros exercícios de priorização na União Europeia. A lista completa foi publicada na Decisão 2015/495/UE (CE - Comunidade Europeia, 2015). A Lista de Vigilância abrange um grupo de 10 substâncias, ou um grupo de substâncias, incluindo aquelas representativas de substâncias químicas desreguladoras endócrinas (duas hormonas naturais: estrona, E1, e 17- β -estradiol, E2; e um estrogênio sintético: 17- α -etinilestradiol, EE2). Devido à remoção incompleta de hormônios de fontes de água, o 17- β -estradiol e o estriol são frequentemente encontrados em ambientes aquáticos. São considerados os principais hormônios produzidos no corpo humano e, em combinação com a progesterona, desempenham papéis fundamentais no controle do ciclo menstrual. Sua presença em corpos d'água naturais é um forte indício de contaminação por esgoto doméstico (Al Aukidy et al., 2012; Torres et al., 2015). Como este estudo se concentrou em estações centralizadas de tratamento de águas residuais e seus riscos ambientais, os desreguladores endócrinos foram escolhidos como poluentes-chave, com atenção específica ao 17- β -estradiol. A concentração de 17- β -estradiol identificada em esgoto bruto varia de 1,11 a 2520 ng L₂, enquanto em esgoto tratado varia de 0,23 a 1240 ng L₂ (Ferreira, 2013; Pessoa et al., 2012). Não há

limites legislativos para a presença de 17- β -estradiol em esgoto bruto e tratado ou em corpos d'água. Portanto, os limites foram estabelecidos (Tabela 1) com base nas concentrações mínimas e máximas identificadas nesses estudos. As vias de exposição, ou seja, ingestão, inalação e adsorção dérmica, e suas ocorrências, ou seja, direta ou indireta, podem ser combinadas de diferentes maneiras (Lima et al., 2022).

As vias de exposição classificadas como de maior risco são a ingestão acidental, seguida pela inalação de gotículas. Em contraste, há evidências limitadas de adsorção dérmica (OMS, 2006). A ingestão inclui a ingestão acidental de água de reuso, ingestão de gotículas e ingestão de alimentos irrigados. A inalação pode ocorrer pela inalação de aerossóis durante a irrigação, ao utilizar um sistema pressurizado, como irrigação por aspersão e irrigação localizada. A absorção dérmica pode ocorrer pelo contato com o sistema de irrigação, vegetação irrigada e equipamentos de proteção que entraram em contato com água de reuso (Rebello et al., 2020; Revitt et al., 2021).

Os riscos diretos e indiretos da água de reuso para o ambiente estão associados à contaminação por infiltração no solo (Deng et al., 2019). Dentre as características do solo, a permeabilidade é particularmente crucial em projetos que avaliam parâmetros de infiltração e de águas subterrâneas, pois indica a capacidade da água de reuso de penetrar em aquíferos subterrâneos através de poros ou vazios do solo (Rodriguez et al., 2015; Singh et al., 2020). Solos arenosos apresentam maiores coeficientes de infiltração e permeabilidade em comparação com solos argilosos (ABNT, 1993; Fernandes, 2016; Pinto, 2006). Além disso, os minerais de argila apresentam reatividade significativa, e sua presença é relevante para as interações entre as fases sólida e líquida. Portanto, solos arenosos receberam valores associados mais elevados do que solos argilosos.

De acordo com Abad et al. (2021), a profundidade do nível d'água e os parâmetros de recarga líquida têm a influência mais significativa na determinação da vulnerabilidade do aquífero devido ao potencial da água de reuso atingir as águas subterrâneas.

Classificação do risco

A partir da identificação e avaliação dos fatores, um valor associado foi atribuído a cada fator de risco que contribui para a PO e a MI. Uma pontuação integrada pode ser deduzida multiplicando-se os valores atribuídos a cada fator que contribui para a PO, MI relacionado à saúde humana e MI relacionado ao ambiente, de acordo com a matriz apresentada na Tabela 2. Para obter uma

lista priorizada, os valores integrados obtidos de PO, $MI_{saúde\ humana}$ e $MI_{ambiente}$ podem ser classificados associando a pontuação integrada obtida a uma escala numérica, com valores predefinidos de 1 (indicando a menor probabilidade/impacto) a 4 (indicando a maior probabilidade/impacto). As faixas de pontuação integrada de PO podem ser interpretadas da seguinte forma:

- Pontuação de PO de 1 a 4: indica que apenas em raras ocasiões a ocorrência de contaminantes na água de reuso resultaria em absorção por receptores, correspondendo a uma pontuação integrada relacionada à probabilidade (PPO) de 1 (rara).
- Pontuação PO de 5 a 12: indica uma possibilidade limitada de ocorrência de contaminantes em água de reuso, resultando em captação por receptores, correspondendo a um PPO de 2 (improvável).
- Pontuação PO de 13 a 36: indica a possibilidade de ocorrência de contaminantes em água de reuso, resultando em captação por receptores, correspondendo a um PPO de 3 (possível).
- Pontuação PO de 37 a 64: indica uma alta probabilidade de ocorrência de contaminantes em água de reuso, resultando em captação por receptores, correspondendo a um PPO de 4 (provável).

Da mesma forma, em relação à MI, as faixas de pontuação integradas obtidas pela matriz apresentada na Tabela 2 podem ser interpretadas da seguinte forma:

- MI relacionado à saúde humana ($MI_{saúde\ humana}$) com uma pontuação de 1 a 2 ou relacionado ao ambiente ($MI_{ambiente}$) com uma pontuação de 1 a 4: indica uma magnitude muito baixa de um efeito direto sobre os receptores, resultando em uma pontuação integrada relacionada à magnitude do impacto na saúde humana ($PMI-H$) ou no ambiente (P_{MI-A}) de 1 (muito baixa).
- $MI_{saúde\ humana}$ com uma pontuação de 3 a 4 ou $MI_{ambiente}$ com uma pontuação de 5 a 12: indica uma baixa magnitude de um efeito direto sobre os receptores, resultando em uma pontuação integrada de P_{MI-H} ou P_{MI-A} de 2 (baixa).
- $MI_{saúde\ humana}$ com uma pontuação de 5 a 9 ou $MI_{ambiente}$ com uma pontuação de 13 a 36: indica uma magnitude média de um efeito direto sobre os receptores, resultando em uma pontuação integrada de P_{MI-H} ou P_{MI-A} de 3 (média).
- $MI_{saúde\ humana}$ com uma pontuação de 10 a 16 ou $MI_{ambiente}$ com uma pontuação de 37 a 64: indica uma alta magnitude de um efeito direto sobre os receptores, resultando em uma pontuação integrada de P_{MI-H} ou P_{MI-A} de 4 (alta).

Tabela 2 – Matriz probabilidade de ocorrência e magnitude de impacto

		Probabilidade de ocorrência (PO)																							
		Fonte (F)				Tipo de Tratam. (T)				Forma de Uso (U)				Outros (O)											
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
Tipo de reúso/ cenário																									
Pontuação integrada		F *T*U*O = PO → PPO																							
		Magnitude de impacto (MI)																							
		Saúde humana								Ambiente															
		Concent. no Efluente Tratado (CS)				Forma de contato (FC)				Outros (Os)				Concentr. no Efluente Tratado (CA)				Característ. do receptor (R)				Outros (Oa)			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Tipo de reúso/ cenário																									
Pontuação integrada		CS*FC*Os = MI _{saúde} → PMI-H																							
		CA*R*Oa = MI _{ambiente} → PMI-A																							

Fonte: A autora, 2023

O valor total para o risco à saúde humana e o risco ambiental para cada alternativa pode ser calculado multiplicando as pontuações integradas dos fatores PO e IM, de acordo com as Equações. (1) e (2).

Risco à saúde humana = PPO x PMI—H equação (1)

Risco ao ambiente = PPO x PMI—A equação (2)

Este método facilitou a classificação de cada risco, utilizando a escala numérica fornecida abaixo. Além disso, a escala foi codificada por cores para melhorar a visualização dos resultados.

- 12 a 16: alto risco e provável de ocorrer (vermelho)
- 9 a 11: risco médio e possível de ocorrer (laranja)
- 5 a 8: baixo risco e improvável de ocorrer (amarelo)
- 1 a 4: risco muito baixo e raro (verde)

Para obter o valor geral do risco, a média dos fatores de MI para saúde e ambiente foi calculada (Equação (3)), e o resultado foi em seguida multiplicado pelo fator PPO (Equação (4)).

$$MP_{MI} = \frac{PMI-H + PMI-A}{2} \quad MP_{MI} = \frac{PMI-H + PMI-A}{2} \quad MP_{MI} = (PMI-H + PMI-A) / 2$$

equação (3)

$$Risco = PPO \times MP_{MI}$$

equação (4)

Tratamento do risco

A partir dos valores de risco, definiu-se neste estudo que riscos com valores inferiores a 4 não requerem ações de tratamento. Riscos com valores entre 5 e 8 são considerados aceitáveis, mas podem ser melhorados com medidas de controle, enquanto riscos com valores > 8 necessitam da implementação de ações de tratamento de risco.

Entre as alternativas para tratar o risco estão medidas de controle e mitigação que alteram a probabilidade de ocorrência e as consequências do risco (ISO, 2018). Portanto, para este estudo, foram definidas ações de tratamento de risco referentes ao tratamento de esgoto. Em alguns casos, torna-se necessária a aplicação de tratamentos mais avançados, visto que os processos tradicionais de tratamento de esgoto podem não ter a capacidade de remover completamente todos os poluentes (Domínguez Henao et al., 2018; Gago-Ferrero et al., 2012; Manasfi et al., 2017; Schneider e Lim, 2019; Sun et al., 2019; Xu et al., 2017; Zúñiga-Benítez e Peñuela, 2018). A implementação de medidas de controle no tratamento de esgoto impacta os valores da probabilidade de ocorrência e a magnitude do impacto de cada forma de reuso de água avaliada.

A eficiência de remoção de E. coli aumenta de cerca de 96% em um sistema de lagoa para uma taxa próxima a 100% em um sistema de lodo ativado (Cavallini et al., 2016; Nogueira, 1999). Embora o tratamento terciário seja eficaz na remoção de E. coli, o tratamento com cloração pode produzir subprodutos tóxicos com efeitos crônicos na saúde humana e no meio ambiente (Domínguez Henao et al., 2018; Schneider e Lim, 2019). Além disso, compostos clorados não são eficazes contra protozoários e helmintos patogênicos (Colli-vignarelli et al., 2018). Tecnologias alternativas para redução de micropoluentes e patógenos implementadas em larga escala incluem processos como filtração terciária, adsorção em carvão ativado e ozonização (de Boer et al., 2022).

Em relação ao 17β-estradiol, o tratamento com lodo ativado é 12% mais eficiente do que o tratamento com lagoas de estabilização (Froehner et al., 2011). A remoção deste contaminante por oxidação com cloro apresenta eficiência entre 24% e 99,60% (Pereira, 2011; Souza, 2014), enquanto a ozonização demonstra eficiência de 93% (Pereira, 2011) e a adsorção por carvão ativado de 90,90% (Peres, 2011).

Considerando os fatores descritos e os métodos de tratamento avaliados, medidas de controle (MC) foram implementadas considerando sua reconhecida eficácia na minimização dos riscos. Assim, considerou-se a seguinte faixa: Conversão do sistema de tratamento da lagoa para tratamento com lodo ativado, MC = 20%; Implementação de tratamento terciário com desinfecção por cloração, MC = 40%; Implementação de tratamento terciário por adsorção/filtração, MC = 60%; Implementação de tratamento terciário por ozonização, MC = 80%.

Os valores de risco total (RT) relacionados à saúde (Equação (5)), ao ambiente (Equação (6)) e ao risco médio (Equação (7)) para cada tipo de reuso de água foram obtidos pela divisão do risco pelo valor da medida de controle correspondente adotada:

$$RT_{saúde} = Risco_{saúde} / (1 + MC) \quad \text{equação (5)}$$

$$RT_{ambiente} = Risco_{ambiente} / (1 + MC) \quad \text{equação (6)}$$

$$RT = Risco / (1 + MC) \quad \text{equação (7)}$$

Aplicação do modelo de análise de risco

Com base nas considerações anteriores, o modelo de análise de risco foi aplicado ao reuso de água para fins agrícolas. A avaliação se concentrou em atividades com significativa importância econômica no Estado do Paraná e alto consumo de água. Esta avaliação utilizou dados de produção agrícola da Secretaria de Estado da Agricultura

e Abastecimento do Paraná (SEAB) para 2021, dados de consumo de água do Instituto de Águas e Terras do Paraná (IAT) de 2020 e coeficientes técnicos da Agência Nacional de Águas (ANA) em 2017. Posteriormente, foi realizada uma análise dos valores de risco obtidos, juntamente com uma avaliação do impacto da implementação de medidas de tratamento no controle de risco.

Resultados obtidos

Os riscos associados ao reúso agrícola estão ligados à origem e à composição do esgoto, seu tipo de tratamento, armazenamento e distribuição, bem como a fatores como técnica de irrigação, práticas agrícolas, clima, condições do solo e condições das águas subterrâneas. Além dessas considerações, uma análise das potenciais rotas de exposição também deve ser conduzida (Helmecke et al., 2020).

Para avaliar a probabilidade de ocorrência relacionada ao reúso agrícola de água, foram considerados fatores como o tipo de fonte de abastecimento de água e os métodos de tratamento aplicados ao efluente. Além disso, como fator de forma de uso, também foi considerado o principal método de irrigação adotado em cada cenário considerado. Para este estudo, não foram considerados fatores específicos adicionais que influenciassem a probabilidade de ocorrência.

As técnicas de irrigação são cruciais porque determinam como a água de reúso é aplicada ao solo, impactando a eficiência e a capacidade do solo de absorver contaminantes. Além disso, o contato humano com a água de reúso durante a irrigação é influenciado pela técnica escolhida, resultando potencialmente na geração de gotículas e áreas alagadas com água de reúso (Revitt et al., 2021).

Entre os métodos de irrigação utilizados, a irrigação subterrânea e localizada oferecem melhor controle sobre o potencial de contaminação, pois regulam a vazão de acordo com as necessidades do solo e envolvem menor envolvimento humano (Helmecke et al., 2020; Piña et al., 2020; Revitt et al., 2021). Consequentemente, esses métodos receberam pontuações 1 e 2, respectivamente. Em contraste, a irrigação por aspersão e a irrigação superficial apresentam maior risco de contaminação devido à maior área afetada, ao contato da água de reúso com as culturas e ao maior contato humano com a água (Revitt et al., 2021). Portanto, a pontuação 3 foi atribuída à irrigação superficial e a pontuação 4 à irrigação por aspersão.

Foram considerados os fatores que influenciam a magnitude do impacto na saúde humana (como a presença de *E. coli* e o método de contato) e no meio ambiente (incluindo a presença de contaminantes emergentes, o tipo de solo e a profundidade do aquífero). Para este estudo, não foram considerados fatores adicionais especí-

ficos que influenciam a magnitude do impacto no contexto da reutilização de água para fins agrícolas.

Aplicação da metodologia

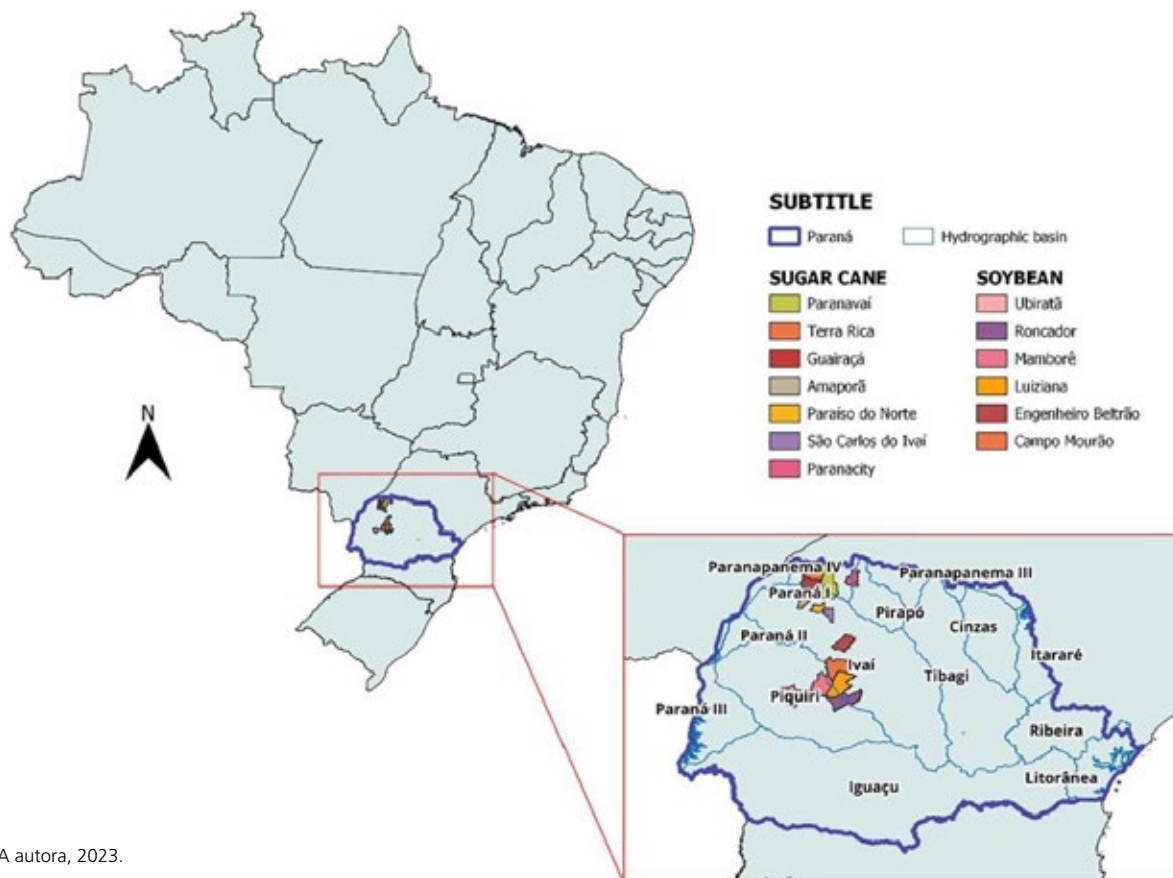
Atualmente, o Brasil possui áreas irrigadas com culturas como arroz, café, cana-de-açúcar, culturas anuais em pivôs centrais e outras culturas e sistemas, totalizando uma área irrigada de aproximadamente 8.200.000 ha. Entre os estados brasileiros, o Estado do Paraná possui uma área irrigada de 255.485 ha, irrigando 189.067 ha de cana-de-açúcar fertirrigada, 19.698 ha de arroz, 13.279 ha de culturas anuais em pivôs centrais e 33.264 ha de outras culturas e sistemas (SNIRH, 2022a). A quantidade média de água consumida para irrigação no Estado do Paraná é de 1,91 m³ h⁻¹ ha⁻¹ (IAT, 2020).

No entanto, a área irrigada no Estado do Paraná representa apenas 3% da área total cultivada no estado. O Paraná possui uma área cultivada de aproximadamente 9,35 milhões de hectares, sendo 59,2% ocupada por soja (5,54 milhões de hectares), 28,3% por milho (2,65 milhões de hectares), 4,3% por cana-de-açúcar (399,9 mil hectares), 4,3% por trigo (405,4 mil hectares) e 3,9% por outras culturas (368,4 mil hectares) (SEAB, 2021). Isso evidencia um potencial significativo para a implementação da irrigação com água de reúso no Estado do Paraná, Brasil.

A maior área cultivada no Estado do Paraná está na região de Campo Mourão, que abrange os municípios de Ubitatã, Roncador, Mamborê, Luiziana, Engenheiro Beltrão e Campo Mourão. É composta pelo cultivo de soja, milho e trigo, correspondendo a 57%, 33% e 10%, respectivamente (SEAB, 2021). A região de Campo Mourão se destaca no cultivo de soja e milho, com uma área de 664.350 ha e 384.964 ha, respectivamente, em 2020. No cultivo de cana-de-açúcar, a região mais importante é Paranavaí, que inclui os municípios de Paranavaí, Terra Rica, Guairaçá, Amaporã, Paraíso do Norte, São Carlos do Ivaí e Paranacity, com uma área cultivada de 146.871 ha em 2020. O mapa esquemático com os estados brasileiros, as regiões de produção agrícola em destaque e as bacias hidrográficas é apresentado na Figura 2.

Assim, para a análise, foi avaliado o reúso de água nas culturas de soja e cana-de-açúcar. Essas culturas foram selecionadas por estarem entre os maiores Valores Brutos da Produção (VBP) do estado em 2020, apresentarem um consumo significativo de água e estarem em diferentes regiões do estado. Foram avaliadas suas características, tipo de irrigação e dados regionais, como tipo de tratamento de águas residuais, tipo de solo e profundidade média do aquífero subterrâneo. Para o reúso agrícola, apenas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) centralizadas foram consideradas como fonte de

Figura 2 - Mapa esquemático com os estados brasileiros, principais áreas cultivadas no Estado do Paraná e bacias hidrográficas



Fonte: A autora, 2023.

água de reúso. O modelo pode ser adaptado para análises futuras, examinando as culturas agrícolas mais importantes para o ano de referência do estudo.

A probabilidade de ocorrência de contaminantes na água de reúso atingirem humanos e o meio ambiente foi identificada em função da fonte de água de reúso, do tipo de tratamento aplicado como barreira e do tipo de irrigação aplicada às culturas.

As Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) centralizadas, apesar de tratarem principalmente esgoto doméstico, também podem receber efluentes de outras fontes, incluindo hospitais e indústrias. No entanto, essas fontes adicionais geralmente passam por pré-tratamento antes de serem lançadas na rede municipal (de Almeida et al., 2018; Emmanuel et al., 2005; Sperling, 2007). Portanto, neste estudo, a fonte residencial de água de reúso foi considerada em ambos os cenários, recebendo pontuação 2.

Os métodos de tratamento de esgoto variam entre os municípios analisados. Na região de Campo Mourão, que inclui os municípios

de Campo Mourão e Ubiratã, o tratamento é realizado por meio de reatores anaeróbios. Já em Engenheiro Beltrão e Mamborê, um sistema de lagoas é empregado. Em Luiziana e Roncador, são utilizados processos simplificados, como fossas sépticas, bacias de infiltração e estações de pré-condicionamento. Na região de Paranavaí, que abrange os municípios de Paranavaí, Paraíso do Norte e Paranacity, o tratamento de esgoto é realizado por meio de reatores anaeróbios. Em Terra Rica, utiliza-se um sistema de lagoas, enquanto em Guairaça, São Carlos do Ivaí e Amaporã, utilizam-se processos simplificados (SNIRH, 2022b). Dentre os métodos de tratamento empregados nos municípios de cada região, foi considerada a alternativa com maior valor associado, atribuindo-se a ambos os casos a nota 4 para o tipo de tratamento.

Em relação aos métodos de irrigação, a soja e outros grãos são tipicamente irrigados por meio de um sistema de aspersão com pivô central (Mello, 2021). Diversos métodos podem ser empregados para a irrigação da cana-de-açúcar, destacando-se os pivôs centrais

e aspersores (ANA, 2017; Licks, 2020). Assim, ambos os cultivos receberam nota 4 para o método de irrigação.

Ao analisar a magnitude do impacto dos riscos associados à saúde humana, a presença de *E. coli* e as formas de contato foram consideradas para ambos os cultivos. A presença de um sistema de tratamento em lagoa e tratamentos simplificados na região estudada permite a presença de *E. coli* igual ou >104 UFC/100 mL (Rebello et al., 2020), atribuindo uma pontuação de 4 para ambos os casos. Como a soja não é consumida diretamente, o risco para os consumidores não é considerado significativo. No entanto, os trabalhadores podem ter contato potencial com água de reuso por meio da ingestão, inalação e adsorção dérmica. A cana-de-açúcar, por outro lado, é consumida diretamente, sem cozimento ou processamento, representando um risco relevante para os consumidores que podem ingerir alimentos potencialmente contaminados com água de reuso. Trabalhadores envolvidos no cultivo da cana-de-açúcar, assim como aqueles no cultivo da soja, podem entrar em contato com água de reuso por ingestão acidental, inalação e adsorção dérmica. O estudo considerou o fator de risco com maior valor associado (pontuação 4) para ambos os casos.

Em relação à magnitude do impacto dos riscos associados ao meio ambiente, foram considerados a presença de contaminantes emergentes (CE), o tipo de solo e a profundidade do nível d'água. O sistema de tratamento por lagoa de estabilização pode remover 56,5% de 17- β -estradiol do esgoto bruto (Froehner et al., 2011). Considerando que o maior valor identificado na literatura é de 2520 ng L-1 (Pessoa et al., 2012), a concentração estimada de 17- β -estradiol na água de reúso é de aproximadamente 1100 ng L-1, recebendo pontuação 4 para ambos os casos.

De acordo com o mapa de solos do IAT, o solo predominante em ambas as regiões consideradas para reúso agrícola é o Latossolo Ver-

melho, seguido por Nitossolo, Neossolo e Cambissolo (IAT, 2020). Conforme discutido na revisão da literatura, os latossolos vermelhos são caracterizados por um teor de silte $<20\%$ e teor de argila variando de 15 a 80% (Embrapa, 2022). Portanto, o solo predominante pode ser descrito como argila siltosa de cor vermelha, com uma pontuação correspondente de 3. A região de Campo Mourão está situada no aquífero Serra Geral, conhecido por sua continuidade lateral significativa. A profundidade média do nível de água neste aquífero é de 30 m, com variações que variam de alguns metros a várias dezenas de metros (Nardy et al., 2002). Em um estudo conduzido por Athayde e Athayde (2016), 337 poços tubulares dentro do aquífero Serra Geral foram avaliados quanto à profundidade e níveis de entrada de água, com o menor valor identificado para entrada de água sendo 6 m. Por outro lado, a região de Paranavaí está localizada no aquífero Caiuá, onde os poços apresentam profundidade média de 150 m (CPRM, 2012). O Aquífero Caiuá, em Paranavaí, não apresenta influência significativa da precipitação na recarga hídrica e no declínio do nível, possivelmente influenciado por um nível estático profundo e seu perfil litológico (Lazzarotto et al., 2017). Portanto, a pontuação 2 é atribuída ao cultivo de soja e a pontuação 1 ao cultivo de cana-de-açúcar.

Portanto, os vários fatores que influenciam a probabilidade de ocorrência atingir os receptores (humanos, aquífero subterrâneo e solo) após a irrigação com águas residuais tratadas podem ser combinados multiplicando-se as pontuações individuais. Isso resulta em um PO de 32, classificado como possível (com uma pontuação PPO de 3) para uso em ambos os casos. Da mesma forma, a magnitude do impacto para a saúde humana e o meio ambiente pode ser obtida multiplicando-se as pontuações atribuídas a cada fator de risco que influencia os receptores. Em relação aos riscos à saúde humana, obteve-se um MI de 16, classificado como de

Tabela 3 – Matriz de riscos para o reúso da água para fins agrícolas

	P_{PO}	P_{MI-H}	P_{MI-A}	Risco à saúde humana ($P_{PO} \times P_{MI-H}$)	Risco ao ambiente ($P_{PO} \times P_{MI-A}$)	Média do fator P_{MI} (MP_{MI})	Valor geral do risco
Reúso agrícola SOJA	3 POSSÍVEL	4 ALTO	3 MÉDIO	12 Risco alto e provável de ocorrer	9 Risco médio e possível de ocorrer	4 ALTO	12 Risco alto e provável de ocorrer
Reúso agrícola CANA DE AÇÚCAR	3 POSSÍVEL	4 ALTO	2 BAIXO	12 Risco alto e provável de ocorrer	6 Risco baixo e improvável de ocorrer	3 MÉDIO	9 Risco médio e possível de ocorrer

Fonte: A autora, 2023.

alto impacto (com pontuação 4 no PMI-H) em ambos os casos. Quanto aos riscos ao meio ambiente, obteve-se um MI de 24, classificado como de médio impacto (com pontuação 3 no PMI-A) para a cultura da soja, enquanto um MI de 12, classificado como de baixo impacto (com pontuação 2 no PMI-A) para a cultura da cana-de-açúcar.

Com base nos resultados obtidos para a probabilidade de ocorrência e a magnitude do impacto de cada fator de risco nos cenários considerados, foram determinados os valores de risco associados à saúde humana e ao meio ambiente para a implementação da irrigação com água de reúso nas culturas estudadas (Tabela 3).

Assim, ambas as alternativas de reúso de água foram classificadas como de alto risco à saúde humana. Levando em consideração a localização geográfica das culturas e as características locais, a irrigação da soja foi avaliada como de médio risco ao meio ambiente, enquanto a irrigação da cana-de-açúcar foi classificada como de baixo risco. Os valores gerais de risco indicam que a irrigação da soja apresenta alto risco nas condições estudadas, enquanto a irrigação da cana-de-açúcar apresenta risco médio. É importante ressaltar que o estudo empregou uma abordagem científica generalizada. No entanto, em aplicações reais, fatores adicionais que influenciam tanto a probabilidade de ocorrência quanto a magnitude do impacto à saúde humana e ao meio ambiente podem ser necessários.

A Tabela 4 apresenta os valores de risco pela aplicação de medidas de controle para as culturas avaliadas. As medidas consideradas para controle de risco abrangem os métodos de tratamento de esgoto, com a adoção dos seguintes cenários: A, Tratamento sem risco; B, Conversão do sistema de tratamento da lagoa para tratamento com lodo ativado; C, Tratamento terciário com desinfecção por cloração;

D, Tratamento terciário por adsorção/filtração; E, Tratamento terciário por ozonização. A implementação de medidas básicas, como a conversão do sistema de tratamento em lagoa para tratamento por lodo ativado, reduz efetivamente o risco ambiental a níveis aceitáveis para ambas as culturas. No entanto, para minimizar ainda mais o risco à saúde humana, são necessárias medidas de segurança mais rigorosas, incluindo a implementação de tratamento terciário por adsorção/filtração e tratamento terciário por ozonização.

Quanto ao risco geral, a mitigação dos riscos associados ao reúso de água para o cultivo de soja requer medidas como a aplicação de tratamento terciário por adsorção/filtração e tratamento terciário por ozonização. Para o reúso de água no cultivo de cana-de-açúcar, a conversão do sistema de tratamento em lagoa para tratamento por lodo ativado atinge um valor de risco aceitável.

Vale ressaltar que o modelo qualitativo de avaliação de risco pode ser ajustado para aplicação em outras regiões geográficas, de acordo com as características, necessidades e legislação locais. Para aplicar a metodologia em diferentes regiões, o primeiro passo envolve a avaliação da legislação vigente, das fontes de água de reúso e de seus usos pretendidos. Em seguida, é essencial identificar os principais fatores que podem influenciar o destino dos contaminantes presentes nas águas residuais tratadas dentro da categoria de reúso selecionada e estudada. Atributos locais, como composição do solo, condições do aquífero e receptores, também devem ser considerados. Posteriormente, os valores associados aos fatores que influenciam tanto a PO quanto a MI precisam ser ajustados de acordo com os fatores específicos identificados em cada região. Essa abordagem permite o cálculo de valores de risco para o reúso de água em diversas regiões e cenários.

Tabela 4 – Matriz de risco com a aplicação das medidas de controle para o reúso agrícola

Reúso agrícola SOJA	CENÁRIO				
	A	B	C	D	E
Risco à saúde humana	12	10	9	8	7
Risco ao ambiente	9	8	6	6	5
Risco geral	12	10	9	8	7

Reúso agrícola CAN-DE-AÇÚCAR	CENÁRIO				
	A	B	C	D	E
Risco à saúde humana	12	10	9	8	7
Risco ao ambiente	6	5	4	4	3
Risco geral	9	8	6	6	5

12 a 16	Risco alto e provável de ocorrer
9 a 11	Risco médio e possível de ocorrer
5 a 8	Risco baixo e improvável de ocorrer
1 a 4	Risco muito baixo e raro

Fonte: A autora, 2023.

Conclusões e recomendações

Este estudo propõe uma metodologia de análise qualitativa de risco para avaliar diversos tipos de reúso de água, examinando as características de cada um e seus impactos na saúde humana e no meio ambiente. A metodologia desenvolvida foi aplicada ao reúso de água não potável para atividades agrícolas de significativa importância econômica no Estado do Paraná, Brasil, com foco naquelas com maior consumo de água. A análise considerou a probabilidade de ocorrência do risco e a magnitude de seu impacto na saúde humana e no meio ambiente, resultando em valores de risco associados. A importância econômica das atividades foi determinada com base em dados de produção agrícola da Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento do Paraná (SEAB) referentes a 2021. Os dados de consumo de água foram obtidos do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do IAT de 2020.

A metodologia foi aplicada com sucesso em diferentes regiões do Estado do Paraná, permitindo a adaptação às características únicas de cada região. Essa adaptabilidade auxilia os comitês estaduais de bacias hidrográficas na formulação de normas para o reúso de água. Embora a metodologia aplicada seja adequada para analisar o risco de diversos tipos de reúso de água, estudos mais específicos podem exigir fatores de risco adicionais e medidas alternativas de controle de risco. Seguir a metodologia apresentada pode aumentar a precisão dos resultados nesses estudos específicos.

Referências Bibliográficas

1. Abad, J., Hermoso De Mendoza, I., Marín, D., Orcaray, L., Santesteban, L.G., 2021. Cover crops in viticulture. A systematic review (1): implications on soil characteristics and biodiversity in vineyard. *Oeno One* 55, 295–312. <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2021.55.1.3599>.
2. ABNT, 1993. NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Al Aukidy, M., Verlicchi, P., Jelic, A., Petrovic, M., Barcelo, D., 2012. Monitoring release of pharmaceutical compounds: occurrence and environmental risk assessment of two WWTP effluents and their receiving bodies in the Po Valley, Italy. *Sci. Total Environ.* 438, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.061>.
3. Alawi, M., Masaad, M., Al-Hussaini, M., 2018. Comparative study of persistent organic pollutant (POP) (chlorinated pesticides, PCBs, and dioxins/furans) concentrations in cancer-affected human organs with those of healthy organs. *Environ. Monit. Assess.* 190. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6856-3>.
4. Amoueyan, E., Ahmad, S., Eisenberg, J.N.S., Gerrity, D., 2019. Equivalency of indirect and direct potable reuse paradigms based on a quantitative microbial risk assessment framework. *Microb. Risk Anal.* 12, 60–75. <https://doi.org/10.1016/j.mran.2019.06.003>.
5. ANA, 2017. Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na Região Centro-Sul do Brasil (Brasília).
6. ANA, 2023. Usos consuntivos da água no Brasil (1931–2030), Agência Nacional de Águas - ANA. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaW50MTIiIiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGltNDY5YS00YjRkLTkyN2ZjZDFiYWY4OCJ9>. (Acesso em 9 Janeiro 2022).
7. Angelakis, A.N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B.E., Tchobanoglous, G., 2018. Water reuse: from ancient to modern times and the future. *Front. Environ. Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026>.
8. Asano, T., 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. McGraw-Hill.
9. Athayde, G.B., Athayde, C.D.V.M., 2016. Hidrogeologia do sistema aquífero serra geral no Estado do Paraná. *Águas Subterrâneas* 29, 315. <https://doi.org/10.14295/ras.v29i3.28406>.
10. Capodaglio, A., Callegari, A., Torretta, V., 2014. Comparative application of different risk assessment models and implications on resulting remediation options. *Environ. Technol. (United Kingdom)* 35, 759–765. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.848941>.
11. Cavallini, G.S., de Sousa Vidal, C.M., de Souza, J.B., de Campos, S.X., 2016. Post-treatment of Anaerobic Reactor Effluent Using Coagulation/Oxidation Followed by Double Filtration, vol. 23. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5836-1>.
12. Chen, S.M., Wu, Y.M., Yang, L., 2014. Application of the analytic hierarchy process for the selection of wastewater reuse targets. *Manag. Decis.* 52, 1222–1235. <https://doi.org/10.1108/MD-11-2012-0794>.
13. Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., Sadiq, R., 2017. Microbial quality of reclaimed water for urban reuses: probabilistic risk-based investigation and recommendations. *Sci. Total Environ.* 576, 738–751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.105>.
14. Collivignarelli, M.C., Abba, A., Benigna, I., Sorlini, S., Torretta, V., 2018. Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability*

- (Switzerland) 10. <https://doi.org/10.3390/su10010086>.
15. CPRM, 2012. Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná, vol. 14 (Belo Horizonte).
 16. de Almeida, P.G.S., Ribeiro, T.B., da Silva, B.S., Azevedo, L. dos S., Chernicharo, C.A. de L., 2018. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 6: Qualidade do efluente. In: Revista DAE, vol. 66, pp. 90–108. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.043>.
 17. de Boer, S., Gonzalez-Rodríguez, J., Conde, J.J., Moreira, M.T., 2022. Benchmarking tertiary water treatments for the removal of micropollutants and pathogens based on operational and sustainability criteria. *J. Water Proc. Eng.* 46. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102587>.
 18. DEFRA, 2011. Guidelines for Environmental Risk Assessment and Management - Green Leaves III (Belo Horizonte).
 19. Deng, S., Yan, X., Zhu, Q., Liao, C., 2019. The utilization of reclaimed water: possible risks arising from waterborne contaminants. *Environ. Pollut.* 254. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113020>.
 20. Domínguez Henao, L., Delli Compagni, R., Turolla, A., Antonelli, M., 2018. Influence of inorganic and organic compounds on the decay of peracetic acid in wastewater disinfection. *Chem. Eng. J.* 337, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.074>.
 21. Dominguez-Chicas, A., Scrimshaw, M.D., 2010. Hazard and risk assessment for indirect potable reuse schemes: an approach for use in developing Water Safety Plans. *Water Res.* 44, 6115–6123. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.007>.
 22. DWA, 2019. Non-potable Water Reuse: Development, Technologies and International Framework for Agricultural, Urban and Industrial Uses. German Association for Water, Wastewater and Waste, Germany.
 23. EC - European Community, 2013. Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. *Off. J. Eur. Union L* 226, 1–17.
 24. EC - European Community, 2015. Decision 2015/495/EU of 20 March 2015 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council - (notified under document C(2015) 1756). *Off. J. Eur. Union L* 78, 40–42.
 25. EC - European Community, 2020. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. *Off. J. Eur. Union L* 177, 32–55.
 26. Embrapa, 2022. Solos tropicais, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais>. (Acesso em 1 junho 2022).
 27. Emmanuel, E., Perrodin, Y., Keck, G., Blanchard, J.M., Vermande, P., 2005. Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater: a proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network. *J. Hazard. Mater.* 117, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.032>.
 28. European Commission, 2016. Guidelines on Integrating Water Reuse Into Water Planning and Management in the Context of the WFD (Brussels).
 29. Fairbairn, D.J., Arnold, W.A., Barber, B.L., Kaufenberg, E.F., Koskinen, W.C., Novak, P.J., et al., 2016. Contaminants of emerging concern: mass balance and comparison of wastewater effluent and upstream sources in a mixed-use watershed. *Environ. Sci. Technol.* 50, 36–45. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03109>.
 30. Fernandes, M.M., 2016. Mecânica dos solos: Conceitos e princípios fundamentais, vol. 1. Oficina de Textos, São Paulo.
 31. Ferreira, A.P., 2013. Desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgotos: Complicações ao meio ambiente. *Acta Sci. Technol.* 35, 307–316. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v35i2.10619>.
 32. Froehner, S., Piccioni, W., Machado, K.S., Aisse, M.M., 2011. Removal capacity of caffeine, hormones, and bisphenol by aerobic and anaerobic sewage treatment. *Water Air Soil Pollut.* 216, 463–471. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0545-3>.
 33. Gago-Ferrero, P., Badia-Fabregat, M., Olivares, A., Piña, B., Blaquez, P., Vicent, T., et al., 2012. Evaluation of fungal and photo-degradation as potential treatments for the removal of sunscreens BP3 and BP1. *Sci. Total Environ.* 427–428, 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.089>.

34. Garfi, M., Ferrer-Martí, L., 2011. Decision-making criteria and indicators for water and sanitation projects in developing countries. *Water Sci. Technol.* 64, 83–101. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.543>.
35. Getirana, A., Libonati, R., Cataldi, M., 2021. Brazil is in water crisis — it needs a drought plan. *Nature* 600, 218–220. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05955-x>.
36. Guo, Q., Wei, D., Wang, F., Chen, M., Du, Y., 2021. A novel risk score-based prioritization method for pollutants in reclaimed water. *Sci. Total Environ.* 795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148833>.
37. Helmecke, M., Fries, E., Schulte, C., 2020. Regulating water reuse for agricultural irrigation: risks related to organic micro-contaminants. *Environ. Sci. Eur.* 32. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0283-0>.
38. IANAS, 2019. Water Quality in the Americas - Risks and Opportunities. Inter-American Network of Academies of Sciences - IANAS, Mexico.
39. IAT, 2020. Relatório de conjuntura dos recursos hídricos do Estado do Paraná. Instituto Água e Terra - IAT, Curitiba.
40. ISO, 2018. ISO 31000: Risk Management - Guidelines, p. 17.
41. Lazzarotto, M.E., Franzini, A.S., Santos, G.N., Kuhn, A.I., 2017. O monitoramento do aquífero Caiuá no Paraná pela rede RIMAS/CPRM. In: *Águas Subterrâneas*.
42. Lee, K., Jepson, W., 2020. Drivers and barriers to urban water reuse: a systematic review. *Water Secur.* 11. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100073>.
43. Licks, E.B., 2020. Viabilidade de irrigação para a produção de cana-de-açúcar nos municípios de Araçatuba e de Piracicaba (Tese). Universidade de São Paulo.
44. Lima, M.A. de M., Santos, A.S.P., Rebelo, A., Lima, M.M., Vieira, J.M.P., 2022. Water reuse in Brazilian rice farming: application of semiquantitative microbiological risk assessment. *Water Cycle* 3, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.04.003>.
45. Malinowski, A., 2006. Aplicação de metodologia para a estruturação de diretrizes para o planejamento do reúso de água no meio urbano (Dissertação). Universidade Federal do Paraná.
46. Manasfi, T., Coulomb, B., Boudenne, J.L., 2017. Occurrence, origin, and toxicity of disinfection byproducts in chlorinated swimming pools: an overview. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 220, 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.01.005>.
47. Mello, D.A., 2021. Avaliação econômica de investimento em sistema de irrigação por aspersão para produção de soja e milho sob condições de risco: Estudo de caso no município de Ourinhos/SP (Tese). Universidade Estadual Paulista.
48. Müller, A.B., Avellan, T., Schanze, J., 2020. Risk and sustainability assessment framework for decision support in “water scarcity – water reuse” situations. *J. Hydrol. (Amst.)* 591. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125424>.
49. Nardy, A.J.R., Oliveira, M.A.F., Betancourt, R.H.S., Verdugo, D.R.H., Machado, F.B., 2002. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. In: *Revista Geociências UNESP*, vol. 21, pp. 15–32.
50. Necibi, M.C., Dhiba, D., El Hajjaji, S., 2021. Contaminants of emerging concern in African wastewater effluents: occurrence, impact and removal technologies. *Sustainability (Switzerland)* 13, 1–12. <https://doi.org/10.3390/su13031125>.
51. Nogueira, V.L.M., 1999. Caracterização de um sistema de lagoas de estabilização numa estação de tratamento de esgotos domésticos em escala real, em Fortaleza, Ceará (Dissertação). Universidade Federal do Ceará.
52. Pan, Q., Chhipi-Shrestha, G., Zhou, D., Zhang, K., Hewage, K., Sadiq, R., 2018. Evaluating water reuse applications under uncertainty: generalized intuitionistic fuzzy-based approach. *Stoch. Env. Res. Risk A.* 32, 1099–1111. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1449-1>.
53. Partyka, M.L., Bond, R.F., 2022. Wastewater reuse for irrigation of produce: a review of research, regulations, and risks. *Sci. Total Environ.* 828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154385>.
54. Pereira, R.O., 2011. Formação de subprodutos do estrona e 17 β -estradiol na oxidação utilizando cloro e ozônio em água (Tese). Universidade de São Paulo.
55. Peres, M.R., 2011. Remoção dos interferentes endócrinos 17-etinilestradiol, 17-estradiol e 4-nonilfenol por adsorção em carvão ativado em pó em água de abastecimento público (Dissertação). Universidade Estadual de Campinas.
56. Pessoa, G.P., Santos, A.B., Souza, N.C., Alves, J.A.C., 2012. Desenvolvimento de metodologia para avaliar remoção de estrogênios em estações de tratamento de esgotos. *Quim Nova* 35, 968–973.
57. Pinã, B., Bayona, J.M., Christou, A., Fatta-Kassinos, D., Guillon, E., Lambropoulou, D., et al., 2020. On the contribution of reclaimed wastewater irrigation to the potential

- exposure of humans to antibiotics, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes - NEREUS COST Action ES1403 position paper. *J. Environ. Chem. Eng.* 8. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.011>.
58. Pinto, C.S., 2006. Curso básico de mecânica dos solos, 3rd ed. Oficina de Textos, Sao Paulo.
 59. Radini, S., Gonzalez-Camejo, J., Andreola, C., Eusebi, A.L., Fatone, F., 2023. Risk management and digitalisation to overcome barriers for safe reuse of urban wastewater for irrigation – a review based on European practice. *J. Water Proc. Eng.* 53. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103690>.
 60. Rebelo, A., Quadrado, M., Franco, A., Lacasta, N., Machado, P., 2020. Water reuse in Portugal: new legislation trends to support the definition of water quality standards based on risk characterization. *Water Cycle* 1, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.006>.
 61. Revitt, D.M., Lundy, L., Fatta-Kassinos, D., 2021. Development of a qualitative approach to assessing risks associated with the use of treated wastewater in agricultural irrigation. *J. Hazard. Mater.* 406. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124286>.
 62. Rock, C.M., Brassill, N., Dery, J.L., Carr, D., McLain, J.E., Bright, K.R., et al., 2019. Review of water quality criteria for water reuse and risk-based implications for irrigated produce under the FDA Food Safety Modernization Act, produce safety rule. *Environ. Res.* 172, 616–629. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.050>.
 63. Rodriguez, T.T., Weiss, L.A., Teixeira, R.S., Branco, C.J.M. da C., 2015. Permeabilidade de Solo Laterítico por Diferentes Métodos, vol. 36. Ciências Exatas e Tecnológicas, Semina, p. 17. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2015v36n2p17>.
 64. Santos, A.S.P., Lima, M.A.M., 2022. Nota Técnica 2 - Aspectos legais relacionados ao reúso de águas como diretriz de institucionalização da prática no Brasil. In: *Cadernos Tecnico Eng Sanit Ambient*, vol. 2, pp. 15–27.
 65. Santos, A.S.P., Lima, M.A.M., Silva Junior, L.C.S., Avelar, P.S., Araújo, B.M., Gonçalves, R.F., et al., 2021. Towards a structured methodology for assessing regional water reuse potential: 01 - terminology and basic concepts. In: *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*, vol. 9, pp. 1–17.
 66. Savun-Hekimog̃lu, B., Erbay, B., Hekimog̃lu, M., Burak, S., 2021. Evaluation of water supply alternatives for Istanbul using forecasting and multi-criteria decision-making methods. *J. Clean. Prod.* 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125080>.
 67. Schneider, S.L., Lim, H.W., 2019. Review of environmental effects of oxybenzone and other sunscreen active ingredients. *J. Am. Acad. Dermatol.* 80, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2018.06.033>.
 68. SEAB, 2021. Caderno Regional Agropecuário, vol. 1.
 69. Shoushtarian, F., Negahban-Azar, M., 2020. World wide regulations and guidelines for agricultural water reuse: a critical review. *Water (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/W12040971>.
 70. Singh, V.K., Kumar, D., Kashyap, P.S., Singh, P.K., Kumar, A., Singh, S.K., 2020. Modelling of soil permeability using different data driven algorithms based on physical properties of soil. *J. Hydrol. (Amst.)* 580. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124223>.
 71. SNIRH, 2022a. Atlas irrigação: Tipologias de irrigação. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/dashboards/911_d339de-2944eb79e4f0b8a96e65b8b. (Accessed 1 June 2022).
 72. SNIRH, 2022b. Atlas esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/we_bappviewer/index.html?id=6d866c5d54c64b17bd53af4bdcfb4b91. (Accessed 1 June 2022).
 73. SNIS, 2022. Diagnóstico temático: Serviços de água e esgoto - Visão geral (Brasília).
 74. Souza, B.P., 2014. Avaliação da remoção de sulfametoxazol, diclofenaco e 17 β -estradiol em água por meio de processo oxidativo com cloro (Dissertation). Universidade Estadual Paulista.
 75. Sperling, M., 2007. Biological Wastewater Treatment Series: Waste Stabilisation Ponds, vol. 3. IWA Publishing, London, UK.
 76. Sun, P., Liu, H., Zhai, Z., Zhang, X., Fang, Y., Tan, J., et al., 2019. Degradation of UV filter BP-1 with nitrogen-doped industrial graphene as a metal-free catalyst of peroxymonosulfate activation. *Chem. Eng. J.* 356, 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.023>.
 77. Thao, N.X., 2018. Evaluating water reuse applications under uncertainty: a novel picture fuzzy multi criteria decision making method. *Int. J. Inform. Eng. Electron. Bus.* 10, 32–39. <https://doi.org/10.5815/ijieeb.2018.06.04>.
 78. Torres, N.H., Aguiar, M.M., Ferreira, L.F.R., Américo, J.H.P., Ma-

- chado, A.M., Cavalcanti, E.B., et al., 2015. Detection of hormones in surface and drinking water in Brazil by LC-ESI-MS/MS and ecotoxicological assessment with *Daphnia magna*. *Environ. Monit. Assess.* 187. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4626-z>.
79. Truchado, P., Gil, M.I., López, C., Garre, A., Lopez-Aragon, R.F., Bohme, K., et al., 2021. New standards at European Union level on water reuse for agricultural irrigation: are the Spanish wastewater treatment plants ready to produce and distribute reclaimed water within the minimum quality requirements? *Int. J. Food Microbiol.* 356 <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109352>.
80. Tzanakakis, V.A., Capodaglio, A.G., Angelakis, A.N., 2023. Insights into global water reuse opportunities. *Sustainability (Switzerland)* 15. <https://doi.org/10.3390/su151713007>.
81. UN, 2015. General Assembly, Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. UNCED, 1992. Agenda 21 (Rio de Janeiro).
82. UN-Water, 2021. Summary Progress Update 2021: SDG 6-Water and Sanitation for All (Geneva, Switzerland).
83. Valbonesi, P., Profita, M., Vasumini, I., Fabbri, E., 2021. Contaminants of emerging concern in drinking water: quality assessment by combining chemical and biological analysis. *Sci. Total Environ.* 758. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143624>.
84. Voulvoulis, N., 2018. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 2, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>.
85. Wang, J., Qin, L., He, H., 2019. Assessing temporal and spatial inequality of water footprint based on socioeconomic and environmental factors in Jilin Province, China. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11030521>.
86. WEF, 2023. The Global Risks Report 2023, 18th ed. World Economic Forum, Geneva, Switzerland.
87. WHO, 2006. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta, and Greywater. World Health Organization - WHO, Geneva, Switzerland.
88. WHO, 2016. Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management. World Health Organization - WHO, Geneva, Switzerland.
89. Xu, B., Li, K., Qiao, J., Liungai, Z., Chen, C., Lu, Y., 2017. UV photoconversion of environmental oestrogen diethylstilbestrol and its persistence in surface water under sunlight. *Water Res.* 127, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.059>.
90. Zhiteneva, V., Hübner, U., Medema, G.J., Drewes, J.E., 2020. Trends in conducting quantitative microbial risk assessments for water reuse systems: a review. *Microb. Risk Anal.* 16 <https://doi.org/10.1016/j.mran.2020.100132>.
91. Zúniga-Benítez, H., Penuela, G.A., 2018. Application of solar photo-Fenton for benzophenone-type UV filters removal. *J. Environ. Manag.* 217, 929–938. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.075>.

Milene Souza Oliveira

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) e Técnica em Edificações pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA).

Mapeamento e análise dos riscos hidrológicos no município de São Paulo/SP: impactos na drenagem urbana

Resumo

O risco hidrológico tem aumentado com a urbanização desordenada e a ocupação de áreas vulneráveis próximas a cursos d'água, agravando enchentes, inundações e alagamentos. Este estudo analisou as áreas de risco hidrológico em São Paulo, com foco nas Zonas Norte, Sul e Leste, por meio de dados do GeoSampa e geoprocessamento no QGIS. A sobreposição entre as áreas de risco e a rede de drenagem revelou forte correlação entre eventos extremos e a malha hidrográfica. A Zona Sul apresentou maior concentração e complexidade de riscos, enquanto a Leste mostrou vulnerabilidade ampla e dispersa. A Zona Norte, com menor densidade, evidenciou pontos críticos ligados à drenagem deficiente. A impermeabilização do solo, a ocupação de áreas de preservação e a falta de infraestrutura são fatores chave para a recorrência dos desastres. As mudanças climáticas, ao intensificar chuvas extremas, tendem a agravar esse cenário. A mitigação dos riscos exige planejamento territorial integrado, requalificação urbana, investimentos em infraestrutura verde e ações voltadas à resiliência climática, com o objetivo de reduzir a vulnerabilidade socioambiental e garantir maior segurança à população.

PALAVRAS-CHAVE: Risco hidrológico, urbanização desordenada, drenagem urbana.

Introdução

O risco hidrológico é um dos riscos classificado como natural (Lourenço, 2018). Os eventos naturais extremos que mais repercutem nas atividades humanas no nosso país são de natureza climática. Embora seja fenômenos naturais, a atuação do homem interferindo nas áreas urbanas ou rurais, ao longo do tempo, tem contribuído para sua maior frequência, intensidade e expansão areolar (Guerra, 2001).

De acordo com Silveira (2014), a ocupação urbana em áreas de planícies de inundação e nas margens de canais fluviais transforma eventos naturais em desastres, uma vez que geram danos à população. Esses prejuízos, geralmente de ordem financeira e social, afetam principalmente os moradores em situação de maior vulnerabilidade socioeconômica.

A Defesa Civil de São Bernardo do Campo – SP (2015) define enchentes como “a elevação do nível d’água no canal de drenagem devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar.” Por sua vez, o Diário Oficial da União define:

Inundação como a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas na bacia hidrográfica.

Enxurrada como o escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte, que pode estar ou não associado ao domínio fluvial (do rio). Provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Apresenta grande potencial destrutivo.

Alagamento como a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em áreas rebaixadas atingindo ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas (Diário Oficial da União, 2013).

Segundo levantamento patrocinado pelo Ministério da Integração Nacional, entre 1990 e 2012 o Brasil enfrentou mais de 30 mil desastres naturais, o que cor-

responde a uma média anual de 1.363 ocorrências (Brasil, 2013). De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED/UFSC, 2013), foram registradas 31.909 catástrofes no país entre 1991 e 2012.

Maia (2007) pontua que os problemas relacionados à drenagem pluvial constituem um dos impactos ambientais mais observados atualmente nas cidades. O autor atribui esse cenário ao modelo de urbanização adotado nas bacias hidrográficas, o qual modifica profundamente as dinâmicas naturais dos fluxos hidrológicos entre os diferentes compartimentos do relevo. Como consequência, fenômenos como as enchentes tornam-se mais frequentes e intensos (Fonseca, 2017).

O estado de São Paulo, localizado na região Sudeste do Brasil, é um dos mais desenvolvidos e populosos do país. É conhecido por sua diversidade cultural, econômica e geográfica. Abrangendo uma área de aproximadamente 248.219,485km² e população de 44.411.238 habitantes (IBGE, 2022). O clima predominante é o Cfa/Cwa, de acordo com a classificação climática de Köppen (1931), caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos.

São Paulo apresenta uma topografia variada, que vai desde planícies costeiras até serras e planaltos no interior. Sua capital, São Paulo/SP, é uma das maiores metrópoles do mundo e um importante centro financeiro, cultural e industrial. A capital, São Paulo/SP, é a maior cidade do país e uma das maiores do mundo, com uma população de 11.451.999 habitantes e área territorial de 1.521,202km² (IBGE, 2022).

De acordo com Oliveira (2024), a gestão dos recursos hídricos no estado de São Paulo enfrenta vários desafios complexos devido à alta demanda por água, urbanização intensa e questões ambientais, devido a fatores como as mudanças climáticas que têm aumentado a variabilidade das chuvas, com períodos mais longos de seca e eventos de chuva intensa, complicando ainda mais a gestão dos recursos hídricos.

Objetivo geral

Analisar a distribuição espacial e as características das áreas de risco hidrológico no município de São Paulo, com foco na relação entre a rede de drenagem e a vulnerabilidade dos bairros, para subsidiar ações de planejamento territorial e gestão de desastres.

Objetivos específicos

- Identificar e mapear as áreas de risco hidrológico classificadas no GeoSampa, estratificando-as em Zonas Norte, Leste e Sul do município de São Paulo.

- Correlacionar a ocorrência das áreas de risco hidrológico com a sobreposição de trechos da rede de drenagem, visando compreender a dinâmica do escoamento superficial e o potencial de inundação, enxurrada e alagamento.
- Contribuir com informações georreferenciadas para a compreensão dos desafios da gestão de recursos hídricos na Região Metropolitana de São Paulo, considerando os impactos das mudanças climáticas e da urbanização.

Metodologia

Os dados espaciais referentes às áreas sujeitas a riscos hidrológicos foram sistematicamente adquiridos a partir da plataforma GeoSampa (2025), um repositório oficial de informações georreferenciadas do município de São Paulo. Para a obtenção desses dados, procedeu-se ao download da camada denominada “Área_Risco_Hidrológico”, localizada na seção “Proteção e Defesa Civil” do portal. Os dados foram disponibilizados no formato shapefile, um padrão vetorial geoespacial amplamente empregado para o armazenamento de feições geométricas e seus atributos.

Após a obtenção do shapefile das áreas de risco hidrológico, os dados foram carregados e visualizados no software QGIS. Para otimizar a análise e a representação espacial, as áreas de risco, compostas por bairros no shp. foram segmentadas em três zonas distintas: Zona Norte (13 bairros), Zona Leste (13 bairros) e Zona Sul (11 bairros), conforme Tabela 1. Essa divisão permitiu uma melhor organização e interpretação dos dados, facilitando a identificação de padrões de risco por região.

Adicionalmente, os trechos de drenagem da área de estudo foram sobrepostos a essas zonas. Essa sobreposição é crucial para compreender a relação entre a rede hídrica e a distribuição das áreas de risco hidrológico, auxiliando na identificação de pontos de maior vulnerabilidade e na elaboração de estratégias de mitigação.

A Figura 1 apresenta a delimitação da área de estudo. A mancha urbana de São Paulo aparece destacada com grande densidade na porção central e norte do município. Essa concentração está relacionada à histórica expansão urbana que teve início no centro histórico e se espalhou ao longo dos eixos viários e ferroviários, especialmente nas margens dos rios Tietê e Pinheiros. Os tons acinzentados predominantes nestas regiões refletem o grau de impermeabilização do solo, com forte presença de edificações, vias e infraestrutura urbana.

Por outro lado, a porção sul do município se destaca por apresentar extensas áreas verdes contínuas, correspondentes a remanescentes da Mata Atlântica. Essa diferenciação espacial revela uma dualidade marcante: de um lado, a intensa urbanização; de outro, a presença de zonas de proteção que atuam como áreas de contenção da expansão urbana e preservação ecológica.

Figura 1 – Caracterização da área de estudo no município de São Paulo/SP



Fonte: Elaboração própria (2025).

A rede de drenagem revela uma malha hidrográfica densa, ramificada e diretamente impactada pela urbanização. Os cursos d'água menores, frequentemente ocultos por canalizações e ocupações irregulares, desempenham papel importante na drenagem pluvial da cidade, mas também representam pontos críticos no contexto dos eventos de alagamento e poluição hídrica. As bacias hidrográficas presentes no município, como a do Alto Tietê, estão constantemente sob pressão das atividades antrópicas, sobretudo nas áreas mais densamente povoadas.

O padrão de expansão urbana tende a avançar em direção às bordas da cidade, especialmente sobre áreas ambientalmente sensíveis. Isso representa um grande desafio para o ordenamento territorial e a sustentabilidade urbana.

Drenagem urbana

Tucci (1995) apresenta uma tipologia com base no escoamento pluvial que pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas devido a dois processos, que ocorrem isoladamente ou combinados: inundações em áreas ribeirinhas e/ou inundações devido à urbanização.

Os desastres naturais, dentre eles as enchentes, alagamentos,

inundações e enxurradas podem ser gerenciados. De acordo com Licco (2015), isso não significa a sua eliminação, mas a compreensão de que os Governos e a sociedade podem desenvolver mecanismos para evitar, diminuir ou mitigar os riscos envolvidos.

A drenagem urbana é um componente crítico da infraestrutura das cidades, diretamente ligada à gestão de riscos hidrológicos e à qualidade de vida da população. No contexto brasileiro, o rápido e muitas vezes desordenado desenvolvimento urbano tem gerado um impacto significativo nos sistemas de drenagem, resultando em um aumento na frequência e magnitude de inundações, enxurradas e alagamentos, além de uma notável deterioração ambiental.

Tucci (2002) afirma que “a Constituição Federal define o domínio dos rios, a legislação de recursos hídricos a nível federal e estabelece os princípios básicos da gestão através de bacias hidrográficas”. Ainda segundo o autor,

Algumas legislações estaduais de recursos hídricos estabelecem critérios para a outorga do uso da água, mas não legislam sobre a outorga relativa ao despejo de efluentes de drenagem. A legislação ambiental estabelece normas e padrões de qualidade da água dos rios através de classes, mas não define restrições com relação aos efluentes urbanos lançados nos rios. Dentro deste contexto o escoamento pluvial resultante das cidades deve ser objeto de outorga ou de controle a ser previsto nos Planos de bacia. Como estes procedimentos ainda não estão sendo cobrados pelos Estados, não existe no momento uma pressão direta para a redução dos impactos resultantes da urbanização Tucci (2002).

O ciclo hidrológico é significativamente alterado em áreas urbanas, sobretudo pela modificação da superfície natural, canalização do escoamento e aumento da poluição, resultante da contaminação do ar, das superfícies urbanas e dos resíduos sólidos descartados pela população. Esse cenário é especialmente preocupante em países em desenvolvimento, onde a urbanização e as intervenções em drenagem ocorrem de maneira insustentável.

Segundo Tucci (2003), “a urbanização produz grande impermeabilização do solo”. Esta relação pode ser obtida relacionando a área impermeável (A_i) e a densidade habitacional (D_h), conforme equação 1.

$$AI \text{ (em \%)} = 0,489 * D_h \quad \text{equação (1).}$$

Para D_h 120 hab/hectare e constante para valores superiores. Equação obtida com base em dados de São Paulo, Curitiba e

Porto Alegre (Campana, 1994). Essa impermeabilização impede a infiltração natural da água no solo, aumentando o escoamento superficial e sobrecarregando os sistemas de drenagem existentes.

A vazão máxima de uma bacia urbana aumenta com as áreas impermeáveis e com a canalização do escoamento. O aumento da vazão máxima depende da impermeabilização do solo e da ocupação da bacia pela população (Leopold, 1968). O aumento relativo pode ser superior a seis vezes com a relação à situação de pré-desenvolvimento. Este aumento ocorre em detrimento da redução da evapotranspiração e do escoamento subterrâneo e da redução do tempo de concentração da bacia (Tucci, 2003).

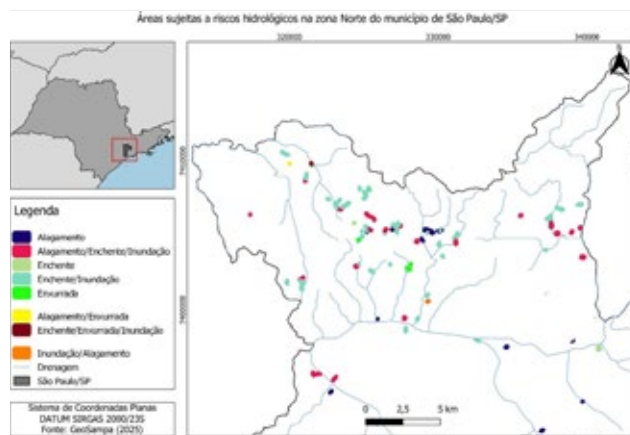
Para mitigar os impactos negativos do desenvolvimento urbano na drenagem, é imperativo adotar uma abordagem estratégica e integrada, alinhada com os princípios de sustentabilidade e resiliência climática. O Plano Diretor de Drenagem emerge como o principal mecanismo para organizar e implementar essas ações, através do equilíbrio do desenvolvimento com as condições ambientais das cidades.

A pressão demográfica, a busca por moradias acessíveis e a especulação imobiliária impulsionaram a expansão das zonas urbanas para locais que, por suas características geomorfológicas, são naturalmente suscetíveis a desastres. As planícies de inundação (várzeas), que historicamente funcionam como sistemas de amortecimento de cheias, têm sido urbanizadas de forma desordenada. A edificação nessas áreas restringe a seção de escoamento dos rios e córregos, elevando o nível d'água durante eventos de cheia e intensificando a frequência e magnitude das inundações. A supressão da vegetação ripária, essencial para a dissipação de energia e estabilização de margens, e a retificação/canalização de cursos d'água, aceleram o fluxo e potencializam processos erosivos e de assoreamento, transferindo o problema para jusante.

ZONA NORTE

A análise espacial da Zona Norte (Figura 2) revela uma distribuição de áreas de risco hidrológico que, embora menos concentrada que na Zona Sul, apresenta pontos críticos significativos.

Figura 2 – Áreas de Risco Hidrológico na Zona Norte do município de São Paulo/SP



Fonte: Elaboração própria (2025).

A densidade de pontos indicando alagamentos, enxurradas e inundações, muitas vezes combinados, sugere que essa região enfrenta uma vulnerabilidade estrutural acentuada. Os pontos de risco não se distribuem uniformemente, mas tendem a se aglomerar em certas porções do território, frequentemente em estreita associação com a rede de drenagem. Vários pontos de Enchente/Inundação e Alagamento/Enchente/Inundação localizam-se diretamente sobre ou adjacentes aos cursos d'água representados.

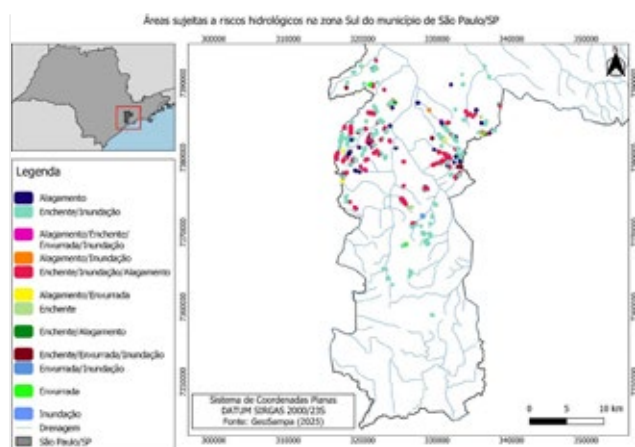
Essa vulnerabilidade está diretamente associada ao processo de urbanização acelerada e desordenada, que comprometeu a permeabilidade do solo e a capacidade da rede de drenagem existente. A presença marcante da rede hidrográfica próxima a esses pontos de risco reforça a hipótese de que o escoamento superficial das águas pluviais é insuficiente, provocando a recorrência desses eventos extremos, especialmente durante períodos de chuvas intensas. Isso sugere uma forte correlação entre a proximidade dos rios e córregos e a ocorrência desses fenômenos, indicando possíveis problemas de capacidade de escoamento dos canais, assoreamento, ou ocupação inadequada das margens e planícies de inundação.

Os problemas na Zona Norte podem estar ligados não à ausência de infraestrutura, mas à sua eficiência ou à ocupação irregular. A distribuição espacial observada na Figura 2 apoia essa hipótese, mostrando riscos concentrados em locais específicos ao longo da drenagem, sugerindo pontos de estrangulamento ou áreas de vulnerabilidade acentuada devido à interação entre a urbanização, a topografia e a rede hídrica.

Zona sul

A Zona Sul (Figura 3) destaca-se pela alta densidade e concentração de áreas de risco hidrológico, particularmente na sua porção mais a norte e oeste do mapa apresentado. Apresenta uma combinação preocupante de fatores: grande extensão territorial e alta concentração de áreas de risco, especialmente nas proximidades das bacias hidrográficas urbanas.

Figura 3 – Áreas de Risco Hidrológico na Zona Sul do município de São Paulo/SP



Fonte: Elaboração própria (2025).

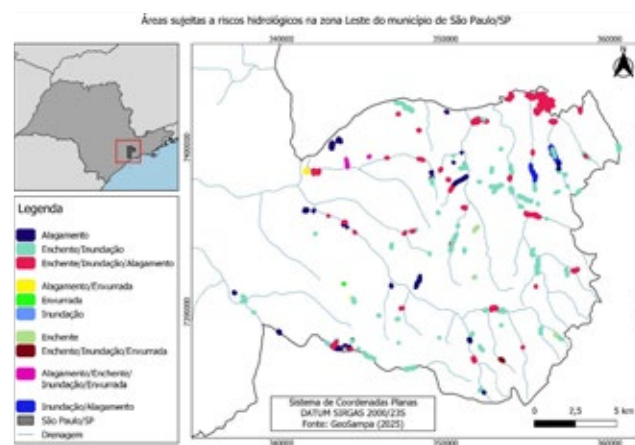
A concentração de pontos de risco é visivelmente maior em comparação com a Zona Norte, e estes pontos frequentemente se alinham ou se sobrepõem diretamente aos cursos d'água da rede de drenagem. A análise visual sugere uma correlação direta e intensa entre a malha hidrográfica e a vulnerabilidade a múltiplos tipos de eventos hidrológicos. Esse quadro reflete a presença de bairros localizados em áreas críticas de drenagem, bem como a ocupação de terrenos de baixa cota topográfica, frequentemente suscetíveis à elevação do nível da água em eventos de precipitação intensa.

A predominância de riscos múltiplos sugere que a infraestrutura de drenagem existente pode ser insuficiente para lidar com os volumes de água gerados pelas chuvas, ou que a ocupação do solo nessas áreas críticas intensifica os problemas de escoamento, levando a alagamentos, transbordamentos de canais (enchentes/inundações) e, potencialmente, fluxos rápidos em áreas de maior declive (enxurradas). A gestão territorial nesta zona enfrenta, portanto, um desafio particularmente complexo devido à combinação de alta vulnerabilidade hidrológica e densidade populacional.

Zona leste

A Zona Leste (Figura 4), apresenta uma distribuição espacial significativa de áreas de risco hidrológico, abrangendo grande parte do território analisado. Nota-se uma significativa presença de áreas de risco espalhadas por quase todo o território analisado.

Figura 4 – Áreas de Risco Hidrológico na Zona Leste do município de São Paulo/SP



Fonte: Elaboração própria (2025).

A densidade de pontos indicando alagamentos, enxurradas e inundações, muitas vezes combinados, sugere que essa região enfrenta uma vulnerabilidade estrutural acentuada. Essa vulnerabilidade está diretamente associada ao processo de urbanização acelerada e desordenada, que comprometeu a permeabilidade do solo e a capacidade da rede de drenagem existente, relacionados tanto ao transbordamento dos cursos d'água quanto à deficiência da drenagem urbana local em absorver ou escoar o volume precipitado.

A significativa presença de áreas de risco sobrepostas ou adjacentes à rede hidrográfica reforça a hipótese de que o escoamento superficial das águas pluviais é insuficiente, provocando a recorrência desses eventos extremos, especialmente durante períodos de chuvas intensas.

A comparação com as outras zonas sugerem que a Zona Leste combina uma ampla dispersão de riscos com focos de concentração, refletindo a heterogeneidade da ocupação e das características do terreno dentro desta vasta região. A vulnerabilidade parece ser generalizada, mas com intensidade variável, fortemente influenciada pela proximidade aos eixos de drenagem e pelas características locais da urbanização.

Comparação entre as zonas

A análise estratificada das Zonas Norte, Sul e Leste do município de São Paulo revela um padrão consistente: a ocorrência de áreas de risco hidrológico está intrinsecamente ligada à rede de drenagem urbana. Em todas as zonas, observa-se uma concentração significativa de pontos de alagamento, enchente, inundação e enxurrada (ou combinações destes) sobrepostos ou em proximidade imediata aos cursos d'água mapeados. Esta correlação espacial direta, identificada como um objetivo específico do estudo, evidencia a vulnerabilidade das áreas adjacentes aos rios e córregos, sejam eles canalizados ou em estado mais natural.

A Zona Sul se destaca pela alta densidade e complexidade dos riscos, sugerindo uma pressão urbana intensa sobre a rede de drenagem, provavelmente associada à ocupação histórica de várzeas e áreas de baixa declividade, combinada com alta densidade populacional. A Zona Leste apresenta uma vulnerabilidade mais dispersa, porém abrangente, indicando que a urbanização extensiva e talvez menos planejada impactou a capacidade de infiltração e escoamento em larga escala. A Zona Norte, embora com menor densidade geral de riscos, demonstra pontos críticos concentrados, possivelmente relacionados a gargalos na rede de drenagem ou a características topográficas específicas que favorecem enxurradas.

A sobreposição dos riscos com a drenagem aponta para a dinâmica do escoamento superficial como fator chave. A impermeabilização do solo, característica da urbanização, aumenta o volume e a velocidade do escoamento superficial, sobrecarregando a capacidade dos canais naturais e artificiais. O resultado são alagamentos em áreas rebaixadas ou com drenagem deficiente, enchentes e inundações por transbordamento dos cursos d'água, e enxurradas em áreas de maior declividade. A presença frequente de riscos combinados (Enchente/Inundação/Alagamento) sublinha a interconexão desses processos durante eventos de chuva intensa.

Estes resultados fornecem informações georreferenciadas cruciais para a compreensão dos desafios da gestão de recursos hídricos na metrópole. A análise espacial demonstra que a gestão não pode se dissociar do planejamento territorial. A localização das áreas de risco indica onde as intervenções são mais urgentes, seja na melhoria da infraestrutura de drenagem, na readequação do uso do solo, na remoção de ocupações irregulares em áreas de preservação permanente (APPs) ou na implementação de sistemas de alerta precoce.

Adicionalmente, os impactos das mudanças climáticas e da contínua urbanização tendem a agravar este cenário. Eventos de chuva mais intensos e concentrados, previstos em cenários

de alterações climáticas, aumentarão a pressão sobre a já vulnerável rede de drenagem. A expansão urbana, se não acompanhada de planejamento adequado e infraestrutura resiliente, continuará a impermeabilizar o solo e a ocupar áreas inadequadas, ampliando as zonas de risco. Portanto, a análise apresentada serve como um diagnóstico fundamental para subsidiar políticas públicas que integrem gestão de águas urbanas, planejamento do uso do solo e adaptação às mudanças climáticas, visando a redução da vulnerabilidade e a construção de uma cidade mais resiliente.

Conclusões

A análise espacial realizada permitiu evidenciar, de forma clara e fundamentada, a estreita relação entre a distribuição das áreas de risco hidrológico no município de São Paulo e a rede de drenagem urbana. Os resultados indicam que a ocorrência de eventos como alagamentos, enchentes, inundações e enxurradas está fortemente associada à proximidade dos cursos d'água (naturais ou canalizados) e à eficiência (ou ineficiência) dos sistemas de escoamento pluvial existentes.

Verificou-se que a Zona Sul concentra o maior número de áreas de risco, caracterizando-se por uma complexa interação entre topografia, adensamento populacional e ocupação de áreas críticas de drenagem, o que agrava significativamente a vulnerabilidade local. Já a Zona Leste apresenta uma dispersão ampla e heterogênea dos riscos, sugerindo uma urbanização extensa, muitas vezes desordenada, que compromete a capacidade de infiltração do solo e sobrecarrega a drenagem urbana. Por fim, a Zona Norte, embora apresente menor densidade de riscos, revela pontos críticos bem definidos, cuja localização estratégica sugere gargalos específicos na drenagem urbana, possivelmente agravados por características topográficas locais.

Esses padrões refletem a influência direta da expansão urbana acelerada e, frequentemente, não planejada sobre a dinâmica hidrológica do município. A impermeabilização extensiva do solo, a ocupação irregular de margens de rios e córregos, bem como a subdimensionada infraestrutura de drenagem, contribuem para a recorrência e a intensidade dos eventos hidrológicos extremos. Tais fatores, somados à variabilidade climática crescente, agravam ainda mais a situação, exigindo estratégias de mitigação e adaptação integradas às políticas de gestão urbana.

A sobreposição entre as áreas de risco e a rede de drenagem, abordada como um dos objetivos específicos deste estudo, proporcionou uma compreensão mais profunda da dinâmica do es-

coamento superficial na cidade. Constatou-se que os eventos de inundação, alagamento e enxurrada são frequentemente interligados e ocorrem de forma combinada, reforçando a necessidade de soluções sistêmicas e multidimensionais.

Os dados georreferenciados obtidos e analisados fornecem subsídios importantes para o planejamento territorial, a gestão de desastres e o enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas. Tais informações podem orientar a priorização de investimentos públicos, a elaboração de planos de contingência, a revisão de políticas de uso e ocupação do solo e a promoção de ações educativas voltadas à construção de uma cidade mais resiliente e adaptada aos desafios hidrológicos contemporâneos.

Referências bibliográficas

1. BRASIL, Ministério da Integração Nacional de Defesa Civil. Banco de Dados e registros de desastres: sistema integrado de informações sobre desastres – S2ID, 2013.
2. CAMPANA, Néstor A.; TUCCI, Carlos EM. Estimativa de área impermeável de macrobacias urbanas. *Revista Brasileira de Engenharia*, v. 12, n. 2, p. 79-94, 1994.
3. CEPED/UFSC. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, 2ª edição, Florianópolis, CEPED/UFSC, 2013.
4. DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Nº 249, terça-feira, 24 de dezembro de 2013, ISSN 1677-7042, p58.
5. FONSECA, Rogério Gerolineto. Risco hidrológico: precipitações extremas, enchentes e alagamentos na cidade de Ituiutaba (MG). 2017.
6. GEOSAMPA, PORTAL. Mapa digital da cidade de São Paulo. 2025. Disponível em: <https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx#>. Acesso em: 27 mai. 2025.
7. GUERRA, Antonio José Teixeira; DA CUNHA, Sandra Baptista. Impactos ambientais urbanos no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
8. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 2022. São Paulo: IBGE, 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama>>. Acesso em: 07 mai. 2025.
9. KÖPPEN, W. Grundriss der Klimakunde: Outline of climate science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388p.
10. LEOPOLD, Luna Bergere. Hydrology for urban land planning: A guidebook on the hydrologic effects of urban land use. US Geological Survey, 1968.
11. LICCO, Eduardo Antonio; MAC DOWELL, Silvia Ferreira. Alagamentos, Enchentes Enxurradas e Inundações: Digressões sobre seus impactos sócio econômicos e governança. *Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística*, v. 5, n. 3, p. 159-174, 2015.
12. LOURENÇO, Luciano; AMARO, António. Riscos e crises: da teoria à plena manifestação. Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press, 2018.
13. MAIA, D. C. Impactos Pluviais na área urbana de Ribeirão Preto – SP. 2007. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) – IGCE, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2007.
14. OLIVEIRA, M. S. Influência dos fenômenos climáticos el niño e la niña na temperatura e precipitação no estado de São Paulo, Brasil. 2024. Disponível em: <<https://docs.sigotech.online/en/controtecnico/2024/35ETC-06600.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2025.
15. SILVEIRA, S. L.; ROBAINA, R.; TRETIN, T. Definição das áreas de perigo de inundação do rio Vacacaí no município de São Gabriel, RS. *GeoTextos*, v. 10, n. 2, p. 99-118, 2014.
16. SÃO BERNARDO DO CAMPO, Defesa Civil. Enchente, Inundação, Alagamento ou Enxurrada. 2021.
17. TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: ABRH/Ed. da UFRGS, 1995. p. 15-36
18. TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gerenciamento da drenagem urbana. Rbrh: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre, RS. Vol. 7, n. 1 (2002 jan./mar.), p. 5-27, 2002.
19. TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Drenagem urbana. *Ciência e Cultura*. São Paulo: Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Vol. 55, n. 4 (out./dez. 2003), p. 36-37, 2003.

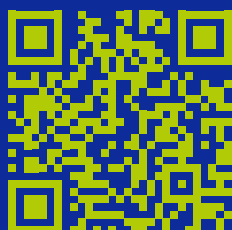


TV **ÁGUA** e SANEAMENTO

FIQUE POR DENTRO DA PROGRAMAÇÃO!

O CANAL DA SUSTENTABILIDADE NO YOUTUBE

SIGA O CANAL NO YOUTUBE



Realização:

