

DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA A RECUPERAÇÃO HÍDRICA: PSA E APPs NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

José Sávio Bezerra¹, Antonia Letícia Paiva de Sousa¹, Ludmylla Beatrice Martins do Nascimento¹, Thayres de Sousa Andrade¹, Janine Brandão de Farias Mesquita¹

Prof^água – Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos,
Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus de Crateús.

1) Introdução

A crescente compreensão da interferência de secas e enchentes na hidrologia de bacias hidrográficas tem impulsionado estudos sobre como as mudanças climáticas intensificam a poluição e dificultam a recuperação de áreas degradadas (Zhang *et al.*, 2016; Puczko & Jekatierynczuk-Rudczyk, 2020; Santy, Mujumdar & Bala, 2020; Qiu *et al.*, 2021). Este acompanhamento científico contínuo é crucial para orientar estratégias de prevenção e remediação das alterações no regime hídrico global.

Os efeitos climáticos nos recursos hídricos, os impactos de eventos extremos na qualidade da água e a aplicação de mecanismos legais de mitigação e recuperação são temáticas fundamentais para o avanço de soluções integradas (Brasil, 2016; Ahmadi, Ahmadalipour & Moradkhani, 2019; Oliveira *et al.*, 2020; Qiu, Shen, Xie, 2023; Castro *et al.*, 2023; Graham, Bierkens & Van Vliet, 2024). Portanto, o fortalecimento do entendimento regional sobre as intervenções climáticas e seus reflexos no comportamento dos recursos hídricos é indispensável para aprimoramento da gestão hídrica.

2) Objetivos

Este estudo visa analisar os desafios das mudanças climáticas na qualidade e disponibilidade hídrica, investigando estratégias de recuperação com foco em PSA e APPs no Brasil. Objetiva-se ainda, identificar interações entre eventos climáticos

extremos e degradação de bacias, discutir o papel do Código Florestal e PSA na conservação hídrica, avaliar desafios na implementação e fiscalização de PSA e proteção de APPs, e sistematizar o conhecimento científico, identificando lacunas para futuras pesquisas em recuperação de áreas degradadas diante do cenário das mudanças climáticas.

3) Metodologia

Este estudo empregou uma revisão bibliográfica sistemática exploratória, analisando criticamente a literatura científica e relatórios técnicos. Seu objetivo foi consolidar o conhecimento sobre os impactos das mudanças climáticas na poluição e disponibilidade hídrica, e nos processos de recuperação de áreas degradadas, com foco em Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e Áreas de Preservação Permanente (APPs).

A estratégia de busca foi delineada para investigar as interações entre as mudanças climáticas e seus reflexos na poluição hídrica, e os desafios de mitigação e recuperação ambiental. Para tanto, foram utilizadas palavras-chave em português e inglês, como "recuperação hídrica", "qualidade da água", "mudanças climáticas", "PSA", "Código Florestal", "gestão hídrica" e "APP", combinadas por operadores booleanos (AND, OR). A pesquisa foi realizada nas bases de dados SciELO, ScienceDirect, SpringerLink e no Portal de Periódicos da CAPES, abrangendo publicações de janeiro de 2009 a 2025.

Para a revisão, foram incluídos estudos em português/inglês (2009-2025) que relacionam mudanças climáticas à degradação da água e estratégias de recuperação (PSA, APPs, legislação), excluindo teses, livros e dados desatualizados. Após triagem, os documentos selecionados foram analisados criticamente para identificar linhas de pesquisa, impactos climáticos na poluição hídrica, eficácia de mecanismos legais e programas ambientais na gestão e recuperação hídrica. Os resultados foram organizados de forma temática, com a sistematização dos dados incluindo a caracterização dos

estudos quanto à localidade, temas abordados e tipo de documento, visando fortalecer a base teórica do estudo.

4) Resultados e Discussão

A diversidade e complexidade dos temas abordados foram organizadas com base na sistematização dos 42 estudos científicos selecionados, entre artigos, dissertações, relatórios técnicos e livros, publicados entre os anos de 2009 e 2025. A Tabela 1 apresenta a distribuição dos estudos por localidade, abordagem teórica e tipo da fonte.

Tabela 1 - Caracterização dos estudos incluídos na revisão bibliográfica

Localidade dos estudos	Número de publicações	Temas abordados	Tipo de documento
Brasil	25	APPs, PSA, uso do solo, eventos extremos	Artigos científicos, leis
América do Norte	5	Poluição difusa, secas, PSA	Artigos científicos
Europa	4	Legislação ambiental, clima e água	Artigos científicos
Ásia e Oceania	5	Enchentes, degradação hídrica, conservação	Artigos científicos
América Latina (exceto Brasil)	3	Gestão de bacias e incentivos ambientais	Relatórios técnicos

Fonte: Autores (2025).

A análise da Tabela 1 revela a predominância de estudos em determinadas localidades e abordagens, ao mesmo tempo em que aponta lacunas significativas. Conforme a sistematização das fontes, identifica-se uma escassez de pesquisas no que

se refere especificamente a ações de recuperação de áreas degradadas com foco na qualidade da água frente aos impactos das mudanças climáticas.

Embora a legislação brasileira ofereça um arcabouço robusto, com destaque para o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e as Áreas de Preservação Permanente (APPs), a aplicação e a avaliação de outros programas ambientais para mitigar as consequências das mudanças climáticas nos recursos hídricos ainda são temas subexplorados, especialmente no contexto brasileiro, onde se concentra a maioria dos estudos. Esta lacuna impede uma compreensão abrangente das contribuições teóricas e metodológicas para a efetiva recuperação hídrica, evidenciando a urgência de se aprofundar na compreensão dos desafios e estratégias.

Nesse contexto de carência de pesquisas aprofundadas sobre soluções, as transformações climáticas, aliadas à exploração excessiva dos mananciais e ao desenvolvimento inadequado de atividades humanas, têm intensificado a degradação e a poluição das bacias hidrográficas. Essa deterioração compromete diretamente a qualidade e a disponibilidade hídrica, sendo agravada por fatores como o uso inadequado do solo, a ocupação irregular de Áreas de Preservação Permanente (APPs), especialmente matas ciliares, e o descarte indevido de efluentes agrícolas e industriais sem tratamento. Tais práticas intensificam a contaminação e a deposição de poluentes em reservatórios, conforme demonstrado em diversos estudos (Bernardi *et al.*, 2012; Bhuiyan *et al.*, 2013; Şener *et al.*, 2017; Mello *et al.*, 2020).

A vulnerabilidade aos referidos processos é acentuada em países em desenvolvimento, como o Brasil, que são particularmente suscetíveis a eventos extremos como inundações, secas, tempestades e ondas de calor. Tais eventos, cuja frequência e intensidade são alteradas pelas mudanças climáticas, impactam diretamente o desenvolvimento social e econômico. Além disso, a modificação da qualidade da água em decorrência das mudanças climáticas pode propiciar a poluição difusa, embora poucos estudos abordem exaustivamente a influência dessas mudanças nos recursos hídricos (Delpla *et al.*, 2009; Ahmed, Zounemat-Kermani & Scholz, 2020; Pereira & Rodrigues, 2022).

Especificamente, as secas são consideradas uma condição de anormalidade do regime hidrológico e climático que afeta a qualidade da água e a higidez da bacia hidrográfica de variadas formas, dada à complexidade e a interdependência dos impactos que variam com as características biofísicas e geoquímicas. Em regiões áridas e semiáridas, onde os recursos hídricos são limitados, secas extremas representam uma preocupação peculiar (Qiu, Shen, Xie, 2023; Athukoralalage *et al.*, 2024).

Durante eventos de secas, o volume de água tende a reduzir, elevando a temperatura e a salinidade, e diminuindo os níveis de oxigênio dissolvido (Ahmadi, Ahmadalipour & Moradkhani, 2019; Graham, Bierkens & Van Vliet, 2024). O aumento da temperatura e a estratificação térmica dos corpos d'água, devido ao aumento da temperatura do ar e tempos de residência hidráulica prolongados, favorecem a produção de algas e florações de cianobactérias produtoras de toxinas, além de aumentar a turbidez. Em conjunto, esses fatores reduzem ainda mais os níveis de oxigênio (Mosley, 2015).

Similarmente, as enchentes, embora processos naturais de ocupação dos leitos maiores dos rios tornam-se desastrosas em áreas mal planejadas ou inadequadamente ocupadas, aumentando a contaminação hídrica ao carrear grandes volumes de sedimentos, matéria orgânica e poluentes químicos e biológicos para os corpos d'água (Pelling & Garshagen, 2019; Batalini *et al.*, 2022).

A imprevisibilidade e intensidade das chuvas, condicionadas por fatores climáticos e meteorológicos, tornam esse fenômeno um desafio para o manejo sustentável dos recursos hídricos, sobretudo em regiões vulneráveis. Embora as chuvas intensas sejam essenciais para recompor reservatórios, elas podem causar transbordamentos de rios, riachos e sistemas de drenagem urbana (Yehia *et al.*, 2017; Miranda, 2020; Oliveira *et al.*, 2020).

Diante desses cenários de degradação intensificada e eventos climáticos extremos como secas e enchentes, a relevância das Áreas de Preservação Permanente (APPs) para o equilíbrio ecossistêmico e a mitigação de tais eventos é inegável, conforme o Código Florestal brasileiro (Lei nº 12.651/2012), que define as faixas marginais de cursos

d'água natural como APPs. Contudo, o crescimento urbano e a rápida mudança no uso e ocupação do solo, associadas às deficiências na fiscalização por parte dos gestores municipais, resultam na alteração contínua dessas áreas.

Ações antrópicas como poluição, desvios de cursos de água, desmatamento das margens e desequilíbrios ambientais afetam diretamente os recursos hídricos, impulsionando a degradação climática e ambiental e afetando importantes serviços ecossistêmicos (Paz, 2019).

Nesse contexto de vulnerabilidade e necessidade de proteção ambiental, a Lei nº 12.651/2012 também estabelece o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) como um instrumento de gestão para a conservação e melhoria de ecossistemas e a prestação de serviços ambientais. O PSA, que pode ser monetário ou não, relaciona-se intrinsecamente à conservação da biodiversidade, dos recursos hídricos, e à manutenção de APPs, Reserva Legal e áreas de uso restrito.

Além disso, a lei prevê compensações por ações de conservação ambiental, como créditos agrícolas, descontos no Imposto Territorial Rural (ITR) e alocação de recursos da cobrança pelo uso da água para manutenção e recuperação de APPs e Reserva Legal (Schimaleski & Garcias, 2020). A aplicação desses mecanismos em áreas que protegem os cursos d'água pode contribuir para a conservação da biodiversidade, dos recursos naturais e culturais (Liu *et al.*, 2023), restauração de ecossistemas aquáticos e, conseqüentemente, assegurar a permanência dos serviços ecossistêmicos, que são essenciais para a sustentabilidade da vida humana (Oguh *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023).

A implementação do PSA no Brasil, no entanto, enfrenta diversos desafios, como a ausência de recursos financeiros, falta de profissionais qualificados e de vontade política por parte dos gestores municipais (Pires Santos, 2022). Embora o número de municípios com programas de PSA tenha crescido entre 2012 e 2020, conforme Castro *et al.* (2023), a descontinuidade desses programas é alta.

Adicionalmente, a recuperação de APPs degradadas também é extremamente complexa, demandando custos financeiros, manutenção contínua e fiscalização eficiente por parte dos gestores (Paz, 2020). Iniciativas como o estabelecimento de parques

ribeirinhos em São Paulo demonstram potencial de reversão da degradação de cursos d'água e áreas de várzea, exercendo um papel importante na manutenção da qualidade ambiental urbana, aumento de áreas permeáveis e cobertura vegetal, regulação de inundações e conservação da água (Silva-Sánchez e Jacobi, 2016).

No entanto, o caso do Programa de Despoluição do Rio Tietê, em São Paulo, ilustra os desafios persistentes, com insucesso devido à urbanização acelerada e desordenada, ocupação irregular das margens, ausência de mecanismos eficazes de controle da poluição difusa e falta de integração entre políticas de saneamento básico, planejamento urbano e preservação ambiental. Interrupções de financiamento e a falta de acompanhamento sistemático também comprometeram a eficácia, resultando em recuperação parcial (Andrade & Melo, 2018).

Dessa forma, diante da intensificação dos eventos climáticos extremos e da contínua degradação das bacias, a conservação e recuperação de APPs que margeiam cursos d'água tornam-se cruciais para a manutenção da biodiversidade, segurança hídrica e sustentabilidade dos serviços ecossistêmicos. A legislação brasileira, através da Lei nº 12.651/2012, e o programa de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) revelam-se como mecanismos legais importantes para a garantia desses benefícios. Todavia, a aplicação desses instrumentos ainda percorre desafios significativos, como a falta de incentivos financeiros e políticos, a ausência de fiscalização e a descontinuidade dos programas, fatores que, por sua vez, dificultam a eficácia de programas ambientais.

5) Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP No. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

6) Referências

ANDRADE, David Oliveira; MELO, Kelly Cristina. Recuperação do rio Tietê: histórico de projetos, custos e problemas socioambientais. **Atas de Saúde Ambiental-ASA (ISSN 2357-7614)**, v. 6, p. 151-167, 2018.

ATHUKORALALAGE, Dilanka *et al.* Impact of hydrological drought occurrence, duration, and severity on Murray-Darling basin water quality. **Water Research**, v. 252, p. 121201, 2024.

AHMADI, Behzad; AHMADALIPOUR, Ali; MORADKHANI, Hamid. Hydrological drought persistence and recovery over the CONUS: A multi-stage framework considering water quantity and quality. **Water research**, v. 150, p. 97-110, 2019.

AHMED, Toqeer; ZOUNEMAT-KERMANI, Mohammad; SCHOLZ, Miklas. Climate change, water quality and water-related challenges: a review with focus on Pakistan. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 22, p. 8518, 2020.

BATALINI DE MACEDO, M. *et al.* Low Impact Development practices in the context of United Nations Sustainable Development Goals: A new concept, lessons learned and challenges. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 14, p. 2538-2581, 2022.

BERNARDI, E. C. S.; PANZIERA, A. G.; BURIOL, G. A.; SWAROWSKY, A. Bacia hidrográfica como unidade de gestão ambiental. **Revista Disciplinarum Scientia. Ciências Naturais e Tecnológicas**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 159-168, 2012.

BRASIL. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2016. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NAP_Brazil_2016_PR.pdf. Acesso em: 14 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de Maio de 2012. Promulga o Código Florestal, 2012.

BHUIYAN, Abul Bashar *et al.* The environmental risk and water pollution: A review from the river basins around the world. **American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture**, v. 7, n. 2, p. 126-136, 2013.

CASTRO, Biancca Scarpeline de *et al.* Caracterização das iniciativas municipais de pagamentos por serviços ambientais no Brasil. **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, 2023.

DELPLA, Ianis *et al.* Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. **Environment international**, v. 35, n. 8, p. 1225-1233, 2009.

GRAHAM, Duncan J.; BIERKENS, Marc FP; VAN VLIET, Michelle TH. Impacts of droughts and heatwaves on river water quality worldwide. **Journal of Hydrology**, v. 629, p. 130590, 2024.

LIU, Yuanxin *et al.* Landscape pattern and ecosystem services are critical for protected areas contributions to sustainable development goals at regional scale. **Science of the Total Environment**, v. 881, p. 163535, 2023.

MELLO, K; TANIWAKI, R.H.; DE PAULA, F. R.; VALENTE, R. A. ; RANDHIR, T. O.; MACEDO, D. R.; LEAL, C. G.; RODRIGUES, C. B.; HUGHES, R. M. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal of Environmental Management**. V. 270, 2020.

MIRANDA, I. P. Efeito da variabilidade temporal das precipitações sobre a disponibilidade hídrica. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, Brasil, 2020.

MOSLEY, Luke M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. **Earth-Science Reviews**, v. 140, p. 203-214, 2015.

OGUH, C. E. *et al.* Ecosystem and ecological services; need for biodiversity conservation-a critical review. **Asian Journal of Biology**, v. 11, n. 4, p. 1-14, 2021.

OLIVEIRA, L. L. *et al.* Efeitos dos eventos extremos climáticos na variabilidade hidrológica em um rio de Ecossistema Tropical Amazônico. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.4, p.145-153, 2020.

PAZ, Candida Fachinetto. Proteção dos recursos hídricos urbanos por meio de pagamento por serviços ecossistêmicos. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, v. 7, n. 1, p. 105-122, 2020.

PELLING, M.; GARSCHAGEN, M. **Put equity first in climate adaptation**. 2019.

PEREIRA, Vânia Rosa; RODRIGUEZ, Daniel Andrés. Vulnerabilidades da segurança hídrica no Brasil frente às mudanças climáticas. **Derbyana**, v. 43, p. e777-e777, 2022.

PIRES SANTOS, Rogério. Discussion on the evolution of public policies for payments for environmental services (PES) in Brazilian municipalities. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 26, 2022.

PUCZKO, Katarzyna; JEKATIERYN CZUK-RUDCZYK, Elżbieta. Extreme hydro-meteorological events influence to water quality of small rivers in urban area: A case study in Northeast Poland. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 10255, 2020.

QIU, Jiali; SHEN, Zhenyao; XIE, Hui. Drought impacts on hydrology and water quality under climate change. **Science of The Total Environment**, v. 858, p. 159854, 2023.

QIU, Jiali *et al.* Synergistic effect of drought and rainfall events of different patterns on watershed systems. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 18957, 2021.

SILVA-SÁNCHEZ, Solange; JACOBI, Pedro Roberto. Implementation of riverside parks in the city of São Paulo—progress and constraints. **Local Environment**, v. 21, n. 1, p. 65-84, 2016.

SCHIMALESKI, Ana Paula Coelho; GARCIAS, Carlos Mello. Reflexões sobre o potencial desconhecido do pagamento por serviços ambientais como instrumento para a gestão de mananciais hídricos urbanos. **Cadernos Metrópole**, v. 22, p. 601-616, 2020.

ŞENER, S.; Şener, E.; Davraz, A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). **Science of the Total Environment**, p.131-144, p. 584-585, 2017.

SANTY, Sneha; MUJUMDAR, Pradeep; BALA, Govindasamy. Potential impacts of climate and land use change on the water quality of Ganga River around the industrialized Kanpur region. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 9107, 2020.

YEHIA, A. G. *et al.* Impact of extreme climate events on water Supply sustainability in Egypt: case studies in Alexandria region and Upper Egypt. **Journal of Water and Climate Change**, v. 08, n. 03, p. 484-494, 2017.

ZHANG, Qiang *et al.* Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e atividades humanas no fluxo de água na bacia do Lago Poyang, China. **Processos Hidrológicos**, v. 30, n. 14, p. 2562-2576, 2016.

ZHAO, Chunyun *et al.* Effectiveness of protected areas in the Three-river Source Region of the Tibetan Plateau for biodiversity and ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 154, p. 110861, 2023.