INTEGRAÇÃO DOS FRAMEWORKS SES E ROBUSTEZ PARA MITIGAÇÃO DE RISCOS HÍDRICOS EM COMUNIDADES VULNERÁVEIS

Leticia de Sena Costa [1] ; Iana Alexandra Alves Rufino [1] & Priscila Barros Ramalho Alves [1,2]

RESUMO: A intensificação das mudanças climáticas associada ao crescimento urbano desordenado tem ampliado os impactos de eventos hidrológicos extremos em comunidades vulneráveis. Diante da insuficiência de abordagens isoladas para enfrentar essa complexidade, este trabalho propõe a integração do Framework de Sistemas Socioecológicos (SES) com o Arcabouço de Robustez para diagnóstico de fragilidades sistêmicas e avaliação de cenários de intervenção voltados à mitigação de riscos hídricos em comunidades urbanas vulneráveis. A integração é operacionalizada por meio de uma matriz de correspondência entre as variáveis de segundo nível do SES e os grupos de links do diagrama de robustez. Os resultados indicam que SR4 (infraestrutura construída pelo homem) é a variável mais conectada do sistema, com associações em quatro grupos de links, posicionando as decisões sobre infraestrutura de drenagem como ponto de maior alavancagem para intervenções. As principais fragilidades identificadas concentram-se no Grupo 2 (participação usuários-provedores) e no Grupo 8 (drivers exógenos socioeconômicos). A análise comparativa de três cenários demonstra que abordagens integradas, combinando infraestruturas verdes com participação comunitária, produzem maior robustez sistêmica do que intervenções exclusivamente técnicas.

ABSTRACT: The intensification of climate change combined with disorderly urban growth has amplified the impacts of extreme hydrological events on vulnerable communities. Given the insufficiency of isolated approaches to address this complexity, this paper proposes the integration of the Social-Ecological Systems (SES) Framework with the Robustness Framework for the diagnosis of systemic fragilities and the evaluation of intervention scenarios aimed at mitigating water-related risks in vulnerable urban communities. The integration is operationalized through a correspondence matrix linking SES second-level variables to the link groups of the robustness diagram. Results indicate that SR4 (human-built infrastructure) is the most connected variable in the system, associated with four link groups, positioning drainage infrastructure decisions as the highest-leverage point for interventions. The main fragilities identified are concentrated in Group 2 (user-provider participation) and Group 8 (exogenous socioeconomic drivers). The comparative analysis of three scenarios demonstrates that integrated approaches, combining green infrastructure with community participation, produce greater systemic robustness than exclusively technical interventions.

Palavras-Chave – Sistemas Socioecológicos; Riscos hídricos; Arcabouço de Robustez.

[1]) Programa de Pòs-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Rua Aprígio Veloso 882, Campina Grande, PB, 58429-900, Tel (83) 2101-1461, senaletticia2.0@gmail.com, iana.alexandra@professor.ufcg.edu.br
2) Stormwater Infrastructure Resilience and Justice Lab, School of Architecture, Planning and Preservation, University of Maryland, 3835 Campus Drive, Building 145, Suite 1200, College Park, MD 20742, Tel (301) 405-8000 pbralves@umd.edu

INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas, associada ao crescimento urbano desordenado e à crescente pressão sobre os recursos naturais, tem ampliado a ocorrência e os impactos de eventos hidrológicos extremos em áreas urbanas vulneráveis (Coletta et al., 2024; Vieira et al., 2025). Nesse cenário, os sistemas de drenagem urbana desempenham papel estratégico na mitigação dos riscos associados aos eventos hidrológicos extremos, influenciando diretamente a capacidade das cidades de absorver, armazenar e conduzir os excedentes hídricos. Entretanto, a efetividade desses sistemas não depende apenas de suas características físicas e hidráulicas, mas também da forma como são planejados, operados e governados, envolvendo múltiplos atores, instituições e processos de tomada de decisão. Diante disso, torna-se necessário adotar abordagens analíticas capazes de compreender não apenas os processos físicos relacionados à dinâmica hídrica, mas também as interações entre instituições, infraestrutura e atores sociais envolvidos na gestão dos riscos.

Os Sistemas Socioecológicos (SES) e o Arcabouço de Robustez destacam-se como referenciais teóricos complementares para essa finalidade, uma vez que permitem analisar a estrutura dos sistemas e as relações que condicionam sua capacidade de adaptação e resposta frente a perturbações ambientais e socioeconômicas (Ostrom, 2009; Anderies, Janssen e Ostrom, 2004).

O Framework de Sistemas Socioecológicos (SES), desenvolvido por Ostrom (2009) e posteriormente aprimorado por McGinnis e Ostrom (2014), organiza qualquer sistema socioecológico em componentes interdependentes, sendo eles Sistemas de Recursos, Unidades de Recursos, Atores e Sistemas de Governança, inseridos em contextos sociais, econômicos, políticos e ecológicos mais amplos.

Complementarmente, o Arcabouço de Robustez proposto por Anderies, Janssen e Ostrom (2004) fornece uma perspectiva voltada à compreensão da capacidade dos sistemas socioecológicos de manter suas funções essenciais frente a mudanças, incertezas e distúrbios. O modelo enfatiza as interações entre recursos naturais, infraestruturas, provedores de infraestrutura e usuários, representadas por diferentes grupos de ligações que expressam fluxos de influência, dependência e retroalimentação. Estudos mais recentes têm ampliado a aplicação do Arcabouço de Robustez para sistemas socioecológicos marcados por elevada complexidade e múltiplos níveis de governança. Nesses cenários, a robustez passa a depender não apenas da infraestrutura física disponível, mas também da qualidade dos fluxos de informação, da coordenação entre instituições e da capacidade de adaptação dos diferentes atores frente a mudanças externas, como aquelas associadas às mudanças climáticas (Anderies et al., 2019).

É nesse cenário que este trabalho tem como objetivo integrar o Framework SES e o Arcabouço de Robustez para diagnosticar fragilidades sistêmicas e avaliar cenários de intervenção voltados à mitigação de riscos hídricos comuns em comunidades urbanas vulneráveis brasileiras que são afetadas por eventos de inundações, identificando variáveis críticas e pontos estratégicos para fortalecimento da robustez socioecológica.

METODOLOGIA

A metodologia adotada é de natureza qualitativa-analítica, baseada na integração de dois frameworks teóricos consolidados na literatura de sistemas socioecológicos. O processo metodológico foi estruturado em quatro etapas sequenciais.

A primeira etapa consistiu na aplicação do Framework SES de Ostrom (2009) ao sistema de drenagem urbana no contexto de comunidades vulneráveis brasileiras. O SES proposto por Ostrom organiza o sistema em quatro componentes principais: Sistema de Recurso (SR) que descreve as características biofísicas do recurso, Sistema de Governança (SG) que abrange as regras, organizações e arranjos institucionais que regulam o acesso ao uso do recurso, Unidades de Recurso (UR) que correspondem ao que é efetivamente apropriado ou afetado pelos usuários, e Atores (A) que são os indivíduos e grupos que interagem com o recurso e com as instituições, todos inseridos em contextos sociais, econômicos e políticos (S) e ecossistemas relacionados (ECO).



Figura 1 - Aplicação do sistema socioecológico para mitigação de riscos relacionados à água em comunidades vulneráveis.

Fonte: Adaptado de McGinnis e Ostrom (2014).

Para cada componente, foram identificadas as variáveis de segundo nível pertinentes ao contexto de riscos hídricos urbanos. As variáveis de segundo nível foram selecionadas a partir da estrutura proposta por Elinor Ostrom (2009) e posteriormente refinada por Michael D. McGinnis e Ostrom (2014), constituindo atributos específicos que permitem detalhar os componentes do Framework SES. Neste estudo, foram consideradas variáveis relacionadas aos contextos sociais, econômicos e políticos, como S1 (desenvolvimento econômico), S2 (tendências demográficas), S3 (estabilidade política), S6 (mídia) e S7 (tecnologias); ao sistema de recursos, incluindo SR1 (setor de recursos), SR3 (Tamanho do sistema de recurso), SR4 (infraestrutura construída pelo homem), SR7 (previsibilidade do sistema) e SR9 (Localização); à governança, abrangendo SG1 (organizações governamentais), SG2 (organizações não governamentais), SG3 (estruturas de rede), SG6 (regras de escolha coletiva), SG7 (regras institucionais) e SG8 (monitoramento e sanção); às unidades de recurso, como UR2 (crescimento ou renovação), UR3 (interação entre unidades), UR4 (valor econômico) e UR7 (distribuição espacial); e aos atores, incluindo A1 (número de atores), A2 (atributos socioeconômicos), A4 (localização), A5 (liderança) e A7 (conhecimento do SES). Essas variáveis constituem a unidade analítica empregada para estabelecer a correspondência entre o Framework SES e o Arcabouço de Robustez. A Tabela 1 a seguir apresenta as variáveis selecionadas.

Tabela 1 - Variáveis de segundo nível do SES.

Subsistema	Variáveis
S (Contextos)	S1, S2, S3, S6, S7
RS (Recurso)	SR1, SR3, SR4, SR7, SR9
SG (Governança)	SG1, SG2, SG3, SG6, SG7, SG8
UR (Unidades)	UR2, UR3, UR4, UR7
A (Atores)	A1, A2, A4, A5, A7
I (Interações)	I1, I2, I5, I8
O (Outcomes)	O1, O2, O3
ECO (Ecossistemas)	ECO1, ECO2

A segunda etapa consistiu na adaptação do Arcabouço de Robustez de Anderies, Janssen e Ostrom (2004) ao contexto de estudo. O diagrama original foi reinterpretado com quatro nós principais: IN (bacia hidrográfica urbana e sistema de drenagem natural), IP (infraestruturas de drenagem e regras de uso e ocupação do solo), PIP (provedores de infraestrutura como ANA, MMA, CEMADEN, agências estaduais e secretarias municipais nos três níveis federativos) e UR (população da localidade afetada).

Os links entre os nós foram classificados conforme as categorias propostas pelos autores: quantitativos (vermelho), qualitativos (verde) e de capacidade de modificação (azul), com subcategorias positivo (P), negativo (N), mudança de característica ou condições (MC), positivo de primeira ordem (PP) e positivo de segunda ordem (PS).

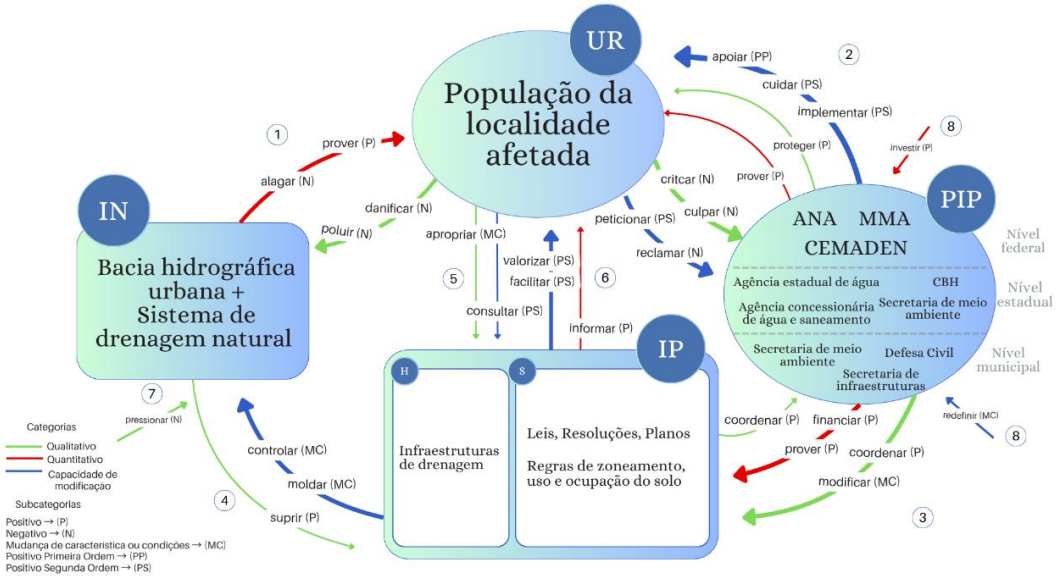


Figura 2 - Aplicação do arcabouço de robustez para mitigação de riscos relacionados à água em comunidades vulneráveis.

Fonte: Adaptado de Anderies *et al.*, (2019).

Os oito grupos de links identificados no diagrama adaptado estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Grupos de links do diagrama do AR.

Grupo	Nós	Descrição da interação
Grupo 1	IN ↔ UR	Fluxos diretos entre recurso natural e usuários (alagamento, provimento)
Grupo 2	PIP ↔ UR	Interações entre provedores e usuários (participação, informação)
Grupo 3	PIP → IP	Ações dos provedores sobre a infraestrutura (construção, manutenção)
Grupo 4	IP ↔ IN	Relação entre infraestrutura e recurso natural
Grupo 5	IP → UR	Efeitos da infraestrutura sobre os usuários
Grupo 6	PIP/IP ↔ UR	Relações regulatórias e de valor econômico
Grupo 7	EX → IN	Drivers exógenos climáticos sobre o recurso natural
Grupo 8	EX → PIP	Pressões exógenas socioeconômicas sobre os provedores

A terceira etapa foi a construção da matriz de correspondência entre as variáveis de segundo nível do SES e os grupos de links do Arcabouço de Robustez. A matriz é uma tabela binária em que as linhas representam as variáveis SES e as colunas representam os oito grupos de links.

A lógica de correspondência seguiu dois passos analíticos. Primeiro, identificou-se o papel funcional de cada variável no sistema: ela descreve o recurso natural? Os provedores? O comportamento dos usuários? Essa identificação conecta a variável a um nó do diagrama (IN, IP, PIP ou UR). Segundo, para cada variável, verificou-se quais grupos de links são ativados quando essa variável muda ou está sob pressão, ou seja, quais interações no diagrama ela ativa ou é ativada por.

Tabela 3 - Matriz de correspondência.

Grupo	Descrição	Variáveis SES
G1	IN ↔ UR	SR1, SR3, SR9, UR2, UR3, UR4, UR7, A1, A4, O3, ECO2
G2	UR ↔ PIP	SG1, SG2, SG6, A1, A5, A7, I2, I8

G3	PIP ↔ IP	SR4, SG1, SG3, SG8, A7, I1, I5
G4	IP ↔ IN	SR1, SR4, O2, O3
G5	UR → IP	SR4, A1, A4
G6	IP → UR	S7, SR4, SG7, SG8, UR4, UR7, A2, O1
G7	EX → IN	SR7, ECO1, ECO2
G8	EX → PIP	S1, S2, S3, S6, SG1, SG3, A2, I5

A análise da distribuição das associações permite identificar os pontos de maior densidade e, consequentemente, os gargalos e fragilidades do sistema.

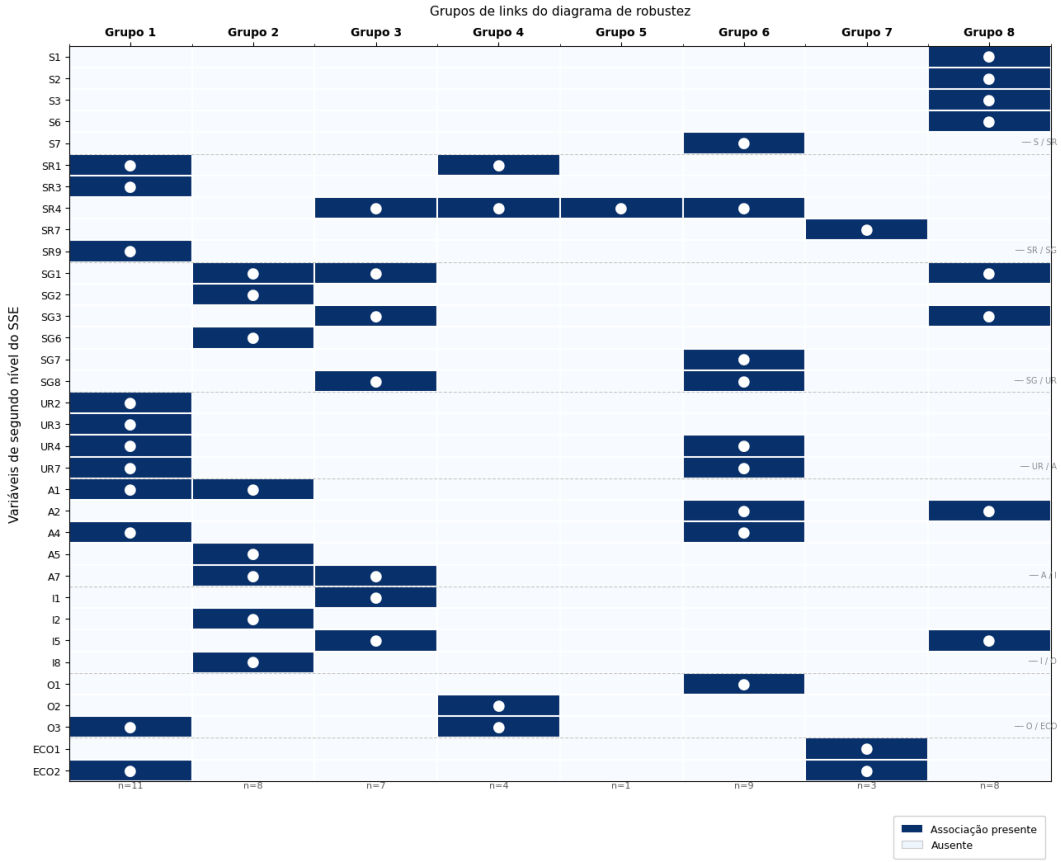


Figura 3 - Matriz de correspondência: Variáveis SES x Grupos de Links (Arcabouço de Robsustez).

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A quarta etapa consistiu na análise comparativa de três cenários de intervenção, avaliados à luz da matriz de correspondência e do diagrama de robustez: (1) status quo, com drenagem convencional e governança fragmentada; (2) adoção de infraestruturas verdes; e (3) abordagem integrada, combinando infraestruturas verdes com participação comunitária e monitoramento. Para cada cenário, foi avaliado quais grupos de links seriam fortalecidos, quais permaneceriam frágeis e como os verbos do diagrama (positivos ou negativos) se transformariam.

A seleção dos três cenários analisados está fundamentada na literatura de gestão de riscos hídricos urbanos. O cenário de status quo representa a condição atual do sistema, sendo necessário como referencial para que se possa avaliar o que cada intervenção efetivamente transforma nas

interações entre os nós do diagrama de robustez (Anderies, Janssen e Ostrom, 2004). O cenário de infraestruturas verdes foi selecionado por representar a principal tendência de inovação técnica na gestão de águas pluviais urbanas, com evidências de redução dos impactos de inundações em áreas urbanas vulneráveis (Coletta *et al*., 2024). O cenário integrado parte do reconhecimento de que intervenções exclusivamente técnicas são insuficientes para alterar as relações institucionais entre provedores e usuários, uma vez que as decisões tendem a permanecer centralizadas nos agentes governamentais, com baixa participação social nos processos decisórios (Vieira *et al*., 2025), combinando infraestruturas verdes com participação comunitária e monitoramento ativo. A progressão entre os três cenários permite identificar não apenas qual deles produz maior robustez, mas porque e quais grupos de links cada nível de intervenção é capaz ou incapaz de fortalecer.

A articulação dessas quatro etapas constitui um processo metodológico progressivo, onde cada etapa alimenta a seguinte: os grupos de links do Arcabouço de Robustez fornecem as colunas; a matriz transforma essa correspondência em um diagnóstico estruturado de associações e lacunas; e a análise de cenários traduz esse diagnóstico em implicações práticas para a gestão. O resultado é uma abordagem que permite identificar, onde o sistema é robusto, onde é frágil e onde intervenções teriam maior efeito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da matriz de correspondência revelou padrões relevantes sobre a estrutura do sistema. Em termos de densidade por coluna, o Grupo 1 (IN ↔ UR) é o mais carregado, com onze variáveis associadas, refletindo a centralidade dos fluxos diretos entre o recurso natural e os usuários, o que é coerente com a natureza do problema: o alagamento impacta diretamente a população. O Grupo 6, com nove variáveis, concentra as interações regulatórias entre infraestrutura e provedores, revelando a complexidade da gestão institucional. Os Grupos 7 e 8, com três e oito variáveis respectivamente, capturam os drivers exógenos climáticos e socioeconômicos que pressionam o sistema de fora.

Em termos de densidade por linha, a variável SR4 (infraestrutura construída pelo homem) é a mais conectada, com associações em quatro grupos de links, seguida de SG1 (organizações governamentais) com três grupos. A partir desse resultado, é possível perceber que a SR4 é o nó de mediação central do sistema, conectando, simultaneamente, provedores, recurso natural e usuários. Qualquer intervenção que modifique SR4, como a adoção de infraestruturas verdes, tem potencial de alterar simultaneamente quatro tipos de interação sistêmica.

A análise da matriz permitiu identificar duas fragilidades estruturais principais do sistema. A primeira diz respeito ao Grupo 2 (PIP ↔ UR), que representa a relação entre provedores de infraestrutura e usuários. Esse grupo concentra variáveis relacionadas à participação social —

organizações não governamentais (SG2), compartilhamento de informação (I2, I8), atributos dos atores (A5, A7), mas, no contexto do status quo, as interações nesse grupo são predominantemente negativas ou inexistentes: a relação é assimétrica, com decisões tomadas sem legitimidade social e baixo engajamento comunitário. Isso compromete a durabilidade de qualquer intervenção, pois sem participação ativa os usuários não apropriam as soluções como suas.

A segunda fragilidade refere-se ao Grupo 8, que capta os drivers exógenos socioeconômicos e institucionais sobre os provedores. Variáveis como S1 (desenvolvimento econômico), S2 (tendências demográficas), S3 (estabilidade política) e A2 (atributos socioeconômicos dos atores) sinalizam que descontinuidade administrativa, austeridade fiscal e crescimento desordenado produzem vulnerabilidade estrutural que o sistema interno não consegue absorver por conta própria. Esse grupo representa o contexto no qual o sistema opera e define os limites do que é possível alcançar com intervenções endógenas.

ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS

Os três cenários avaliados produzem efeitos distintos sobre os grupos de links do diagrama de robustez, conforme sintetizado na tabela a seguir.

Tabela 4 - Análise de cenários.

Cenário	Caracterização	Grupos ativados	Efeito sobre robustez
Status quo	Drenagem convencional (canais de concreto), participação limitada, fiscalização débil	Grupos 1, 7 (pressão)	Grupos 2, 5 frágeis; verbos negativos dominam o diagrama
Infraestruturas verdes	Adoção de jardins de chuva, telhados verdes, pavimentos permeáveis	Grupo 4 fortalecido	Grupos 2 e 5 permanecem frágeis; participação e monitoramento ausentes
Integrado (verdes + participação)	Infraestruturas verdes combinadas com monitoramento comunitário e sanções graduais	Grupos 1, 2, 4, 5, 6	Maior robustez sistêmica; verbos se transformam: participar, capacitar, monitorar

No cenário de status quo, os verbos que dominam o diagrama são negativos, como alagar, poluir, danificar, protestar, e o sistema opera em modo predominantemente reativo. Os links dos Grupos 2 e 5 são especialmente frágeis, e o Grupo 7 exerce pressão exógena sem mecanismos de resposta adequados.

No cenário de infraestruturas verdes, a adoção de jardins de chuva, telhados verdes e pavimentos permeáveis fortalece o Grupo 4 (interação entre infraestrutura e recurso natural), com evidências na literatura de redução significativa dos pontos de inundação (Veiga et al., 2021). No entanto, os Grupos 2 e 5 referentes à participação social e monitoramento comunitário permanecem frágeis, pois a intervenção é essencialmente técnica e não altera as relações institucionais entre provedores e usuários.

Nesse sentido, o fortalecimento destes grupos requer medidas complementares orientadas para a gestão participativa, como a representação efetiva das comunidades em espaços de governança local, o monitoramento comunitário participativo, que cria condições para a aplicação de sanções graduadas legitimadas pelos próprios usuários e a coprodução de mapas de risco por meio de oficinas que articulem conhecimento técnico e local, fortalecendo as variáveis A5 (liderança) e A7 (conhecimento do SES). Essas medidas não substituem as infraestruturas verdes, elas as tornam socialmente sustentáveis, garantindo que as intervenções técnicas sejam legitimadas e mantidas pelos próprios usuários ao longo do tempo.

O cenário integrado, que combina infraestruturas verdes com participação comunitária e monitoramento ativo, é o que produz maior robustez sistêmica. Neste, os verbos do diagrama se transformam para participar, capacitar, monitorar, valorizar, e os grupos de links anteriormente frágeis passam a ser ativados positivamente, e o monitoramento comunitário ativo cria condições para a aplicação de sanções graduais, mecanismo identificado por Ostrom (1990) como essencial para a sustentabilidade de sistemas de governança coletiva.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho demonstrou que a integração dos Frameworks SES e Robustez, operacionalizada pela matriz de correspondência, constitui uma abordagem analítica robusta para o diagnóstico de sistemas de gestão hídrica em contextos vulneráveis. A análise revelou que SR4 (infraestrutura construída) é a variável mais conectada do sistema, o que posiciona as decisões sobre infraestrutura de drenagem como o ponto de maior alavancagem para intervenções.

As fragilidades identificadas, sendo elas: participação frágil no Grupo 2 e vulnerabilidade estrutural aos drivers exógenos no Grupo 8, indicam que intervenções exclusivamente técnicas são insuficientes. A robustez hídrica em contextos vulneráveis exige fortalecer simultaneamente a infraestrutura física e as relações institucionais e tratar apenas um dos lados garante que o outro continuará falhando.

A análise de cenários corrobora essa conclusão, em que o cenário integrado, que combina infraestruturas verdes com participação comunitária e monitoramento, é o único que ativa positivamente todos os grupos de links críticos do sistema. Os demais cenários produzem melhorias parciais que não alteram a lógica estrutural de vulnerabilidade.

Por fim, este trabalho reafirma que a robustez de sistemas hídricos urbanos em contextos vulneráveis é, fundamentalmente, uma questão socioecológica e não apenas hidráulica. Sua contribuição está em oferecer um método que torna as interdependências entre os diversos atores visíveis e rastreáveis. A matriz de correspondência não é uma resposta definitiva, mas um instrumento

de diagnóstico que pode orientar escolhas mais informadas sobre o que fortalecer e o que não ignorar na construção de sistemas hídricos mais justos e resilientes.

REFERÊNCIAS

ANDERIES, J. M.; BARRETEAU, O.; BRADY, U. Refining the Robustness of Social-Ecological Systems Framework for comparative analysis of coastal system adaptation to global change. Regional Environmental Change, Heidelberg, v. 19, n. 7, p. 1897-1915, 2019.

ANDERIES, J. M.; JANSSEN, M. A.; OSTROM, E. A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. Ecology and Society, Ottawa, v. 9, n. 1, art. 18, 2004.

COLETTA, V. R. et al. Socio-hydrological modelling using participatory System Dynamics modelling for enhancing urban flood resilience through Blue-Green Infrastructure. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 638, p. 131248, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131248. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169424007708. Acesso em: 25 mar. 2026.

DUMIEŃSKI, G. et al. Social-ecological systems for sustainable water management under anthropopressure in Poland. **Sustainability**, Basel, v. 18, n. 2, p. 993, 2026. DOI: 10.3390/su18020993. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/18/2/993. Acesso em: 25 mar. 2026.

VEIGA, M. et al. Robustez socioecológica e avaliação da eficácia da infraestrutura verde em uma bacia urbana com assentamento precário. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021, Belo Horizonte.

McGINNIS, M. D.; OSTROM, E. Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. Ecology and Society, Ottawa, v. 19, n. 2, p. 30, 2014.

OSTROM, E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, Washington, DC, v. 325, n. 5939, p. 419-422, 2009.

VIEIRA, R. M. S. P. et al. Integrated evaluation of socio-environmental data and hydrological risk for adapting urban areas to extreme climate events in Salvador, Brazil. International Journal of Disaster Risk Reduction, Amsterdam, v. 121, p. 105382, 2025.