

Desempenho de pontes sob cheias extremas e lacunas regulatórias: evidências das cheias de 2024 no Rio Grande do Sul

Bridge performance under extreme floods and regulatory gaps: evidence from the 2024 floods in Rio Grande do Sul

Yamila Soledad Chicherit¹, Daniel Gustavo Allasia Piccilli², Jose Goes Vasconcelos³, André Lübeck⁴, Rutinéia Tassi⁵, Magnos Baroni⁶, João Francisco Carlexo Horn⁷, e Laisa Cancian⁸

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, chicherityamilasolead@gmail.com, 0009-0001-9630-5786

²Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, dallasia@gmail.com, 0000-0003-4519-8404

³Auburn University, Auburn, Alabama, EUA, jgv0001@auburn.edu, 0000-0003-0438-4286

⁴Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, andre.lubeck@ufsm.br, 0000-0001-5772-9933

⁵Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, rutineia@gmail.com, 0000-0002-8315-5686

⁶Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, magnosbaroni@gmail.com, 0000-0002-1026-3467

⁷Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, jfchorn@gmail.com, 0000-0002-7319-5895

⁸Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, laisa.cancian@gmail.com, 0009-0009-0426-1009

Recebido: 18 de março de 2026

Revisão final: 1 de julho de 2026

Aceito: 10 de julho de 2026

Publicado: 17 de setembro de 2026

Editor Associado:

Jorge Soares

Universidade Federal do Ceará, Brasil

Palavras-chave:

Pontes;

Cheias extremas;

Normativas técnicas;

Resiliência estrutural;

Adaptação climática.

Keywords:

Bridges;

Extreme floods;

Technical standards;

Structural resilience;

Climate adaptation.

DOI: 10.58922/transportes.v34.e3234



RESUMO

As enchentes extremas de 2024 no Rio Grande do Sul (RS) afetaram mais de 1.300 pontes rodoviárias, configurando um dos maiores episódios de comprometimento da infraestrutura viária no Brasil. Este estudo analisa 13 pontes danificadas na região central do RS, confrontando evidências de campo, modelagem hidrológica-hidráulica com critérios normativos vigentes (ABNT, DNIT e DAER-RS) e recomendações de adaptação climática da Nota Técnica IPH-UFRGS (2024). Os resultados sugerem que a magnitude da vazão de pico, isoladamente, não explica plenamente os danos observados, indicando a necessidade de considerar mecanismos hidráulico-estruturais adicionais. Abordagens simplificadas, baseadas em escoamento uniforme e velocidades médias, mostraram-se insuficientes para representar as solicitações hidrodinâmicas. Medições de campo indicaram velocidades desuniformes superiores a $6,0 \text{ m.s}^{-1}$. Processos erosivos ocorreram em 77% das pontes e submersão total da superestrutura em cerca de 85% dos casos. Também foram observados efeitos associados ao acúmulo de detritos, obstrução hidráulica, instabilidade de margens e limitação da altura livre. A comparação com diretrizes internacionais reforça a necessidade de critérios orientados por desempenho e risco, especialmente para condições associadas a eventos extremos.

ABSTRACT

The extreme floods of 2024 in Rio Grande do Sul (RS), Brazil, affected more than 1,300 road bridges, representing one of the largest episodes of transportation infrastructure damage in the country. This study analyzes 13 damaged bridges in central RS by comparing field evidence and hydrologic-hydraulic modeling with current design standards issued by ABNT, DNIT, and DAER-RS, as well as climate adaptation recommendations from the IPH-UFRGS Technical Note (2024). The results suggest that peak discharge magnitude alone does not fully explain the observed damage, indicating the need to consider additional hydraulic-structural mechanisms. Simplified approaches based on uniform flow and mean velocities proved insufficient to represent hydrodynamic loads. Field measurements indicated highly nonuniform velocities exceeding 6.0 m.s^{-1} . Erosive processes occurred at 77% of the bridges, while complete submergence of the superstructure occurred in approximately 85% of the cases. Effects associated with debris accumulation, hydraulic obstruction, bank instability, and insufficient freeboard were also observed. Comparison with international guidelines reinforces the need for performance- and risk-based criteria, particularly under conditions associated with extreme events.

1. Introdução

As mudanças climáticas têm intensificado a frequência e a magnitude de eventos hidrológicos extremos, impondo desafios crescentes à infraestrutura de transportes. No sul do Brasil, entre abril e maio de 2024, registraram-se precipitações recordes, com volumes superiores a 450 mm em quatro dias, picos de

100 mm.h⁻¹ e períodos de retorno (TR) estimados acima de 300 anos (INMET, 2024; CEMADEN, 2024; Collischonn *et al.*, 2024; Tassi *et al.*, 2026). O evento provocou danos expressivos à malha rodoviária do Rio Grande do Sul (RS), incluindo cerca de 1.360 pontes afetadas (Boni, 2024).

Na região central do estado do Rio Grande do Sul os impactos foram particularmente severos. No município de Santa Maria (SM), 35 pontes foram danificadas, das quais 20 foram totalmente destruídas, além do bloqueio de 135 vias. Em 2025, novos episódios de inundações agravaram esse cenário, evidenciando a recorrência de eventos severos e a vulnerabilidade da infraestrutura viária regional (Santa Maria, 2024; Silveira, 2025).

Embora os danos observados no RS estejam associados a um contexto hidrológico extremo, eles também revelam vulnerabilidades que podem ser recorrentes em outras regiões do país, especialmente quanto ao estado de conservação, à manutenção, à recuperação e ao reforço estrutural de obras de arte especiais. Essa preocupação torna-se mais relevante diante da existência de centenas de pontes federais em condição crítica e de registros de colapsos associados a eventos hidrológicos intensos em outros estados (Pinto, 2021; Bonin, 2025; Diário de Pernambuco, 2026).

A análise das falhas observadas deve considerar não apenas as condições estruturais das pontes, mas também os processos hidráulicos e geomorfológicos que condicionam seu desempenho durante eventos extremos. Entre os mecanismos recorrentes de falha, destacam-se a erosão local e a erosão por contração, associadas ao aumento das velocidades de escoamento, à concentração de fluxos e à formação de vórtices em torno de pilares e encontros. O acúmulo de detritos também exerce papel relevante, ao reduzir a capacidade hidráulica da seção, intensificar as solicitações hidrodinâmicas e contribuir para o comprometimento das fundações Arneson *et al.* (2012); Yang *et al.* (2021); Palermo, Pagliara & Roy (2021); Erpicum *et al.* (2024). Dessa forma, o colapso estrutural resulta da interação entre a magnitude hidrológica do evento, as solicitações hidráulicas, a geometria da travessia, as condições de fundação, a dinâmica geomorfológica local e os critérios adotados em projeto.

Essa complexidade evidencia que a avaliação de pontes frente a eventos hidrológicos extremos não pode se limitar à verificação de parâmetros hidrológicos isolados. São necessários critérios capazes de representar a interação entre escoamento, morfodinâmica fluvial e resposta estrutural. Apesar da existência de normativas nacionais e estaduais consolidadas no Brasil, persistem limitações relacionadas à incorporação de modelagens hidrodinâmicas representativas, à avaliação sistemática de processos erosivos, definição técnica de altura livre e à consideração explícita de mudanças no uso do solo e no regime climático. Além disso, a verificação permanece predominantemente prescritiva, com critérios fixos, como períodos de retorno (TR) e margens mínimas, o que dificulta a avaliação do desempenho em termos de segurança e risco.

Nesse sentido, abordagens baseadas em desempenho e risco têm sido recomendadas, integrando modelagem hidrológica-hidráulica avançada, avaliação geomorfológica e estratégias preventivas de mitigação de erosão e detritos no projeto e gestão de pontes (Wardhana & Hadipriono, 2003; Silva, 2008; Lagasse *et al.*, 2012; Zevenbergen *et al.*, 2012; AASHTO, 2020; Cerema, 2019). No entanto, no contexto brasileiro, ainda há uma lacuna entre essas recomendações e a prática normativa aplicada à avaliação de pontes, especialmente quanto à verificação, com base em evidências pós-desastre, da capacidade dos critérios vigentes de representar os mecanismos hidráulico-estruturais observados em campo.

Diante dessa lacuna, este artigo avalia a aderência entre os critérios normativos brasileiros – ABNT, DNIT e DAER-RS, complementados pela Nota Técnica IPH-UFRGS (Paiva *et al.*, 2024) – e o desempenho hidráulico-estrutural observado em 13 pontes danificadas no evento de 2024 na região central do RS. A análise é conduzida a partir de diferentes etapas analíticas que incluem: (i) caracterização dos mecanismos de falha observados em campo; (ii) estimativa, por meio de modelagem hidrológica-hidráulica, das vazões, níveis e velocidades de escoamento associados ao evento e aos cenários de projeto e de adaptação climática; (iii) confronto dos parâmetros estimados (vazão, velocidade média e máxima, altura livre, grau de submersão) com os critérios atuais; e (iv) identificação de lacunas normativas e proposição de diretrizes técnicas para aumentar a resiliência das estruturas frente a eventos extremos. Para fundamentar essa avaliação, a seção seguinte sistematiza as principais diretrizes normativas aplicáveis ao projeto, à verificação e à inspeção de pontes no contexto brasileiro e estadual, destacando os critérios adotados e suas lacunas frente aos mecanismos observados no evento de 2024.

2. Critérios normativos e lacunas para avaliação de pontes frente a cheias extremas

O projeto de pontes rodoviárias no RS segue um conjunto de normativas federais e estaduais que estabelecem critérios hidrológicos, hidráulicos e estruturais para dimensionamento e avaliação de segurança das obras. Nesse conjunto, destacam-se as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as instruções e manuais do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), aplicáveis às rodovias federais, e as diretrizes do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do RS (DAER-RS), voltadas aos empreendimentos estaduais (Figura 1).

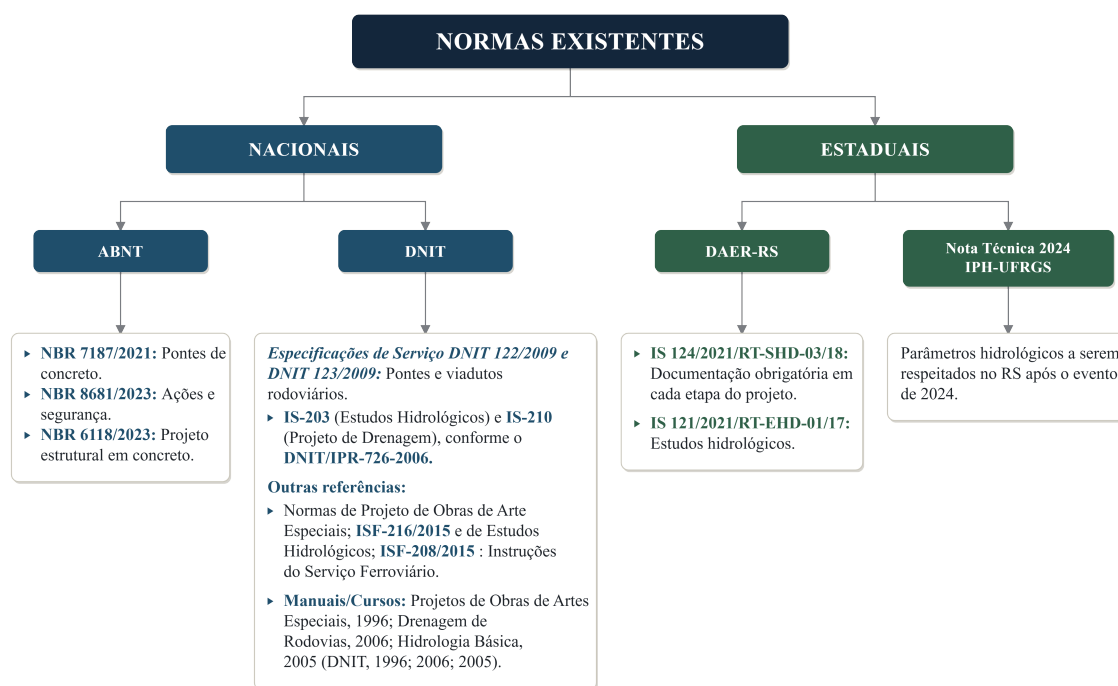


Figura 1 • Principais diretrizes aplicáveis no RS para incorporação de condicionantes hidrológicas e hidráulicas no projeto de pontes

Embora estes documentos constituam uma base técnica consolidada para projeto de pontes, parte de seus critérios foi formulada sob premissas de estacionariedade hidrológica e com simplificações hidráulicas compatíveis com séries históricas e condições de projetos convencionais. A intensificação recente de eventos hidrológicos extremos exige, portanto, avaliar sua aderência ao desempenho observado em campo, especialmente diante de mecanismos de falha associados à erosão, ao acúmulo de detritos, à submersão da superestrutura e à concentração local de velocidades.

As diretrizes vigentes foram organizadas em três dimensões para fins de análise: (a) critérios hidrológicos, (b) critérios hidráulicos, (c) procedimentos de inspeção e manutenção preventiva. As Tabelas 1 a 3 são utilizadas como matriz de comparação entre as diretrizes vigentes e as lacunas normativas identificadas pós-evento hidrológico extremo de 2024. A identificação dessas lacunas foi realizada por meio do confronto sistemático, item a item, entre os critérios previstos nos documentos normativos analisados, as recomendações técnicas disponíveis na literatura e as evidências hidrodinâmicas, geomorfológicas e estruturais observadas em campo e/ou estimadas para o evento de 2024. Foram consideradas lacunas as situações em que os documentos não apresentavam critério explícito, apresentavam tratamento apenas qualitativo ou não contemplavam mecanismos relevantes evidenciados no evento extremo analisado. Na ausência de norma estadual aplicável, consideraram-se normas de outros estados.

As Tabelas 1 a 3 evidenciam que as diretrizes vigentes apresentam cobertura desigual entre as dimensões hidrológica, hidráulica e de inspeção preventiva. No eixo hidrológico, observa-se uma base normativa mais estruturada para a definição de vazões de projeto, ainda que dispersa em documentos com diferentes níveis de obrigatoriedade e com limitada incorporação de incertezas, mudanças climáticas e

Tabela 1 • Diretrizes aplicáveis à avaliação hidráulico-estrutural de pontes no RS e lacunas identificadas frente a cheias extremas: critérios hidrológicos

Dimensão técnica e conceito chave	Diretrizes Aplicáveis/ Manuais	Crítérios Atuais	Lacunas Normativas Pós-2024
Probabilidade de falha/TR associada ao período de recorrência (TR) Risco de excedência da vazão de projeto	DNIT ISF-208/2015 (DNIT, 2015) DAER IS121/21 e RT-EHD-01/17 (DAER-RS, 2017, 2021) Nota Técnica IPH-UFRGS (Paiva et al., 2024)	$TR \geq 100$ anos para o projeto (pontes federais e estaduais).	Ainda não é exigido como diretrizes: (a) majoração do TR adotado no projeto (b) incorporação de critérios relacionados às mudanças climáticas. Abordagem determinista (incertezas não quantificadas).
Adaptação climática e uso do solo Integração dos seus efeitos nos parâmetros hidrológicos de projeto	Nota Técnica IPH-UFRGS (Paiva et al., 2024)	Recomenda-se: (i) Usar a série histórica mais longa, incluindo extremos recentes (1941, 2023, 2024). (ii) Adotar como referência a maior cheia observada, ou marcas de cheia na ausência de registros. (iii) Para mudança climática, adotar o cenário mais conservador entre a majoração de magnitude (fatores sobre precipitação/vazão) e a majoração do TR de projeto ($TR \approx 350$ para bacias $> 1.000 \text{ km}^2$ e $TR \approx 450$ para bacias $\leq 1.000 \text{ km}^2$).	A abordagem permanece centrada na variabilidade climática e em análise de frequência estacionária, sem tratar explicitamente não estacionariedade e mudanças de uso e cobertura do solo, nem estabelecer procedimento para atualização periódica de parâmetros e avaliação de cenários.
Modelagem hidrológica Estimativa da vazão de projeto a partir de dados de chuva e características físicas da bacia	IS-121/21 DAER-RS Manual de Hidrologia Básica (DNIT, 2005)	Utilizar séries pluviométricas com, no mínimo, 30 anos. Estimar o tempo de concentração com equações adequadas às características físicas da bacia. Métodos conforme área da bacia: $< 10 \text{ km}^2$: Método Racional; $10 - 2.500 \text{ km}^2$: Método do Número da Curva (CN) + Hidrograma Unitário Triangular (HUT).	Ausência de limites de aplicabilidade para CN e HUT quanto à umidade antecedente, tipo e uso/cobertura do solo. Não há procedimentos para bacias $> 2.500 \text{ km}^2$. Não exige calibração/validação do modelo. Pressupõe estacionariedade e considera de forma limitada mudanças no uso do solo.

alterações no uso e cobertura do solo. No eixo hidráulico, as lacunas são mais expressivas: não há critérios mínimos consolidados para altura livre e avaliação de processos erosivos, o tratamento do acúmulo de detritos é simplificado, e não são estabelecidos procedimentos obrigatórios para estimar velocidades máximas locais junto às estruturas. Já no eixo da inspeção preventiva, embora sejam reconhecidos aspectos como a erosão, obstruções por detritos, altas velocidades e exposição de fundações, faltam critérios técnicos equivalentes para incorporar esses mecanismos de forma sistemática no projeto, na verificação de segurança e na priorização de intervenções.

Em conjunto, essas lacunas indicam uma assimetria entre os mecanismos reconhecidos como relevantes para a segurança de pontes — especialmente erosão, detritos, submersão e velocidades locais elevadas — e os critérios efetivamente exigidos para seu dimensionamento, verificação e gestão. Essa assimetria fundamenta a análise desenvolvida nas seções seguintes, nas quais os parâmetros normativos são confrontados com o desempenho observado em 13 pontes danificadas pelo evento extremo de 2024.

3. Área de estudo

As pontes analisadas concentram-se predominantemente no município de Santa Maria e em áreas limítrofes, na região central do RS. Entre as 13 estruturas avaliadas, oito localizam-se em bacias do setor nordeste da Bacia do Rio Ibicuí (IB), afluente do sistema do Rio da Prata, enquanto as cinco restantes situam-se em afluentes do Arroio Grande, na Bacia do Alto Jacuí (AJ), cujo sistema de drenagem se direciona à Lagoa dos Patos (Figura 2).

As pontes estudadas situam-se em uma zona de transição geomorfológica entre o Planalto Meridional e a Depressão Central, caracterizada por forte contraste topográfico, com desníveis superiores a 500 m em aproximadamente 20 km, vales encaixados e planícies aluviais. Essa configuração favorece respostas hidrológicas rápidas, especialmente em bacias de menor porte e com tempos de concentração reduzidos. Geologicamente, a região é dominada pela Formação Serra Geral, com basaltos associados a solos predominantemente argilosos e de baixa permeabilidade, o que limita a infiltração, intensifica o escoamento superficial e favorece processos de erosivos, instabilidade de margens e transporte de sedimentos durante eventos extremos (SEMA, 2001; Diedrich, 2011; Marion, Hendges & Andres, 2018; SPGG, 2024).

Tabela 2 • Diretrizes aplicáveis à avaliação hidráulico-estrutural de pontes no RS e lacunas identificadas frente a cheias extremas: critérios hidráulicos

Dimensão técnica e conceito-chave	Diretrizes Aplicáveis/ Manuais	Critérios Atuais	Lacunas Normativas Pós-2024
Modelagem hidráulica Determinação de níveis e velocidades máximas (V_{max}) para a vazão de projeto, considerando características da seção e do trecho	IS-121/21; Guia de Análise de Projetos Rodoviários (DNIT, 2018)	DAER-RS recomenda o uso da equação da continuidade e da fórmula de Manning. O DNIT orienta o uso de Manning, HEC-RAS ou curvas-chave, considerando efeito de remanso, perdas de carga, risco de erosão ou solapamento e impacto de obstruções no escoamento.	Simplificação para escoamento uniforme. O HEC-RAS é citado apenas como recomendação, sem critérios mínimos de modelagem (regime de escoamento, extensão do trecho, condições de contorno e escolha/justificativa 1D/2D), nem diretrizes de verificação/validação. Curvas-chave são frágeis em extrapolações, sobretudo sob mudanças climáticas.
Velocidade de escoamento Função da declividade, geometria, rugosidade e vazão; controla as ações hidrodinâmicas na ponte e condiciona erosão e transporte de sedimentos/detritos	NBR 7187 (ABNT, 2021); Manual de Hidráulica Aplicada a Rodovias (IPR-751 - Vol. 2) (DNIT, 2023)	A NBR 7187:2021 define a pressão hidrodinâmica p atuante sobre os elementos estruturais da ponte como $p = k v_a^2$, em que v_a é a velocidade média do escoamento e k depende da forma do pilar e do ângulo de ataque do fluxo. O DNIT (2023) indica $v_a = 5,0$ m/s como referência conservadora para o dimensionamento estrutural.	A ABNT não estabelece procedimento para estimar v_a no local, e o DNIT tende a apresentar valores de referência genéricos. Na prática, sem modelagem ou medição específica, são frequentemente adotadas velocidades "padrão": $v_a = 1,5$ m/s (Mendes, 2017), $v_a = 2,0$ m/s (Pfeil, 1979; Marchetti, 2008) e $v_a = 2,5$ m/s (Araújo, 2018) que pode resultar em subdimensionamento, pois a adoção de valores padrão não captura as V_{max} locais.
Erosão Mecanismos: (i) erosão de longo prazo do leito do rio, (ii) erosão por contração, (iii) erosão local (socavação em pilares), (iv) migração lateral do canal	Não há exigência específica nas normas do Brasil	A avaliação costuma se basear em velocidades/tensões "limite" admissíveis do leito e margens e na análise do efeito da ponte (pilares, redução de seção, alterações do regime hidráulico), com eventual previsão de medidas de proteção.	Ausência de procedimento obrigatório e padronizado para estimar socavação (profundidade potencial) e instabilidade do canal, bem como de requisitos mínimos de projeto para mitigação e prevenção de erosão (p.ex., critérios para fundações, proteções, dissipação e direcionamento de fluxo).
Detritos O acúmulo de detritos eleva as ações hidráulicas sobre tabuleiro e apoios, podendo intensificar remanso, redirecionar o escoamento e agravar erosão/solapamento. Depende da disponibilidade de material e da manutenção/limpeza	NBR 7187 (ABNT, 2021)	Na ausência de dados, recomenda-se representar o acúmulo por uma geometria idealizada (triângulo isósceles invertido alinhado ao pilar) e estimar a pressão associada por: $p = 0,71 v_a^2$, em que v_a é a velocidade média do escoamento.	A norma trata o acúmulo de detritos de forma simplificada, sem contemplar cargas por impacto nem os efeitos morfodinâmicos/erosivos associados ao transporte sólido intenso e à obstrução progressiva. Faltam critérios estruturais e quantitativos para caracterizar transporte/acúmulo de detritos e seus impactos em cheias extremas, bem como diretrizes de gestão da bacia quanto à produção e disponibilidade de detritos.
Altura livre Distância vertical entre o nível máximo esperado da lâmina d'água (incluindo remanso) e a face inferior do tabuleiro. Essa folga acomoda oscilações do nível, ondas e a passagem de detritos, reduzindo risco de impacto e obstrução	Não há exigência específica de altura livre nas normas vigentes no RS	Normas de outros estados brasileiros adotam valores mínimos como referência, considerando detritos e remanso: São Paulo: mínimo de 1,0 m (DER-SP, 2006) Tocantins: mínimo de 1,5 m (Araújo, 2018).	Não há requisito mínimo de altura livre no RS. Faltam critérios vinculados ao risco aceitável e à importância da via, além de diretrizes de margens de segurança considerando remanso, detritos e possível não estacionariedade climática e cheias mais longas.

Tabela 3 • Diretrizes aplicáveis à avaliação hidráulico-estrutural de pontes no RS e lacunas identificadas frente a cheias extremas: procedimentos de inspeção e manutenção preventiva

Dimensão técnica e conceito-chave	Diretrizes Aplicáveis/ Manuais	Critérios Atuais	Lacunas Normativas Pós-2024
Inspeção preventiva Avaliação do estado da estrutura e indicação de ações (nova vistoria, manutenção, recuperação, reforço ou reabilitação)	DNIT 010/2024 - PRO (DNIT, 2024)	Recomenda verificar, em períodos de cheia, a suficiência da seção de vazão e indícios de acúmulo de materiais flutuantes (balseiros/retenção nos apoios); solicitar desobstrução do curso d'água quando necessário. Observar sinais de altas velocidades, erosão de margens e alterações do perfil do canal. Verificar exposição/descalcamento de fundações; realizar topobatimetria se houver suspeita de desconfinamento. Inspecionar integridade de enrocamentos e demais proteções.	Faltam procedimentos sistemáticos e padronizados (métodos, checklists e critérios objetivos), o que aumenta a dependência do inspetor e a variabilidade entre inspeções. Não há critérios claros para definir frequência mínima e níveis de detalhamento em função da importância da obra, nem protocolos específicos de avaliação pós-eventos extremos.

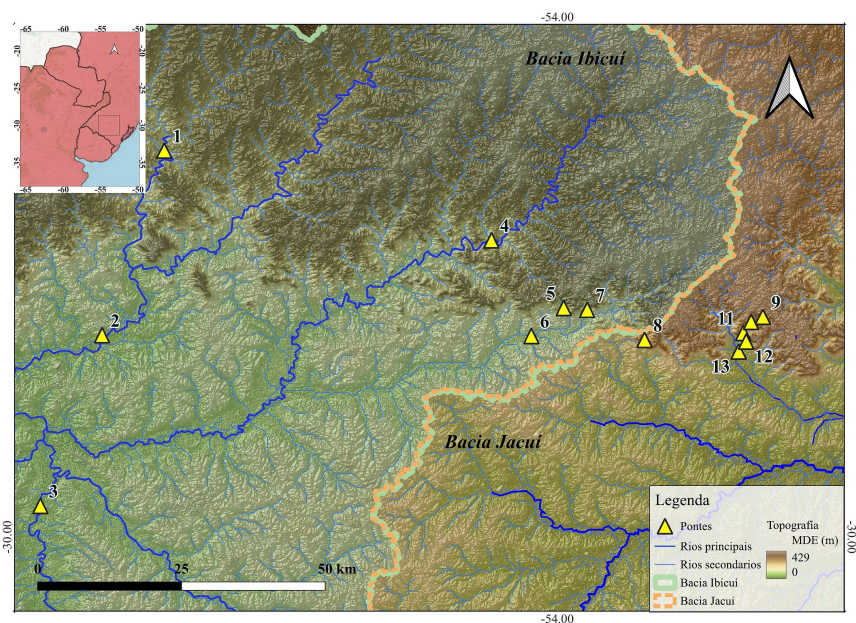


Figura 2 • Localização das pontes do estudo

Tabela 4 • Características hidrográficas e morfométricas das bacias associadas às pontes analisadas no estudo

ID	Ponte	Curso d'água	Coordenadas	S regional (%)	Área bacia (km²)	TC (h)
1	Santiago	Rio Jaguarizinho (IB)	−54,709 O; −29,303 S	0,2%	830,0	9,9
2	São Vicente	Rio Jaguari (IB)	−54,821 O; −29,636 S	0,1%	4194,1	52,8
3	Cacequi	Rio Santa Maria (IB)	−54,933 O; −29,943 S	0,01%	13005,0	168,0
4	Quevedos	Rio Toropi (IB)	−54,119 O; −29,464 S	0,5%	1734,0	20,3
5	Santo Antônio	Rio Ibicuí-Mirim (IB)	−53,988 O; −29,586 S	1,5%	13,8	1,1
6	São João	Rio Ibicuí-Mirim (IB)	−54,047 O; −29,637 S	0,1%	411,5	13,2
7	Quilombo	Arroio Lajeado Quilombo (IB)	−53,946 O; −29,590 S	2,2%	10,1	1,1
8	Barbosa	Arroio Ferreira (IB)	−53,843 O; −29,644 S	3,0%	8,1	0,7
9	Toaldo	Arroio Lobato (AJ)	−53,653 O; −29,623 S	3,3%	21,7	0,7
10	Giacomini	Arroio Lobato (AJ)	−53,664 O; −29,632 S	1,5%	27,3	0,9
11	Lobato Montante	Arroio Lobato (AJ)	−53,666 O; −29,641 S	1,5%	30,1	1,3
12	Lobato Jusante	Arroio Lobato (AJ)	−53,669 O; −29,643 S	1,5%	31,9	1,3
13	Invernadinha	Arroio Grande (AJ)	−53,673 O; −29,665 S	0,3%	213,6	5,2

ID: identificação conforme Figura 2; S: declividade média do curso d'água; TC: tempo de concentração da bacia

A Tabela 4 apresenta as principais características hidrográficas e morfométricas das bacias associadas às pontes analisadas, abrangendo desde travessias em bacias com área inferior a 10 km² até estruturas localizadas em cursos d'água de maior porte, com áreas de contribuição superiores a 1.000 km². Essa diversidade permite confrontar os critérios normativos vigentes em diferentes condições de resposta hidrológica, velocidade de escoamento, suscetibilidade à erosão, acúmulo de detritos e submersão da superestrutura.

Mais de 50% das pontes analisadas localizam-se em pequenas bacias hidrográficas, com áreas de drenagem inferior a 100 km². Essas bacias tendem a apresentar resposta hidrológica mais rápida, maior sensibilidade à distribuição espacial da precipitação e maior influência de mudanças no uso e cobertura do solo. Como grande parte dos desastres hidrológicos no Brasil ocorre justamente em bacias dessa natureza, frequentemente próximas a áreas urbanas (Seluchi, 2024), a combinação entre eventos extremos recentes, bacias de resposta rápida, contrastes topográficos, solos de baixa permeabilidade e diferentes configurações de travessias rodoviárias constitui uma base empírica particularmente adequada para avaliar a aderência entre os critérios normativos brasileiros e o desempenho hidráulico-estrutural observado em campo.

4. Materiais e métodos

O estudo foi desenvolvido como uma análise pós-evento de 13 pontes danificadas por cheias extremas na região central do Rio Grande do Sul. A abordagem pós-desastre é adequada para investigar mecanismos de falha, avaliar o desempenho de estruturas sob solicitações reais e subsidiar a revisão de critérios de projeto, inspeção e gestão de risco (Wardhana & Hadipriono, 2003; Arneson *et al.*, 2012; Steinritz *et al.*, 2024). Neste artigo, essa análise foi estruturada a partir da integração de quatro eixos principais: evidências de campo, caracterização física das bacias hidrográficas, modelagem hidrológico-hidráulica e comparação com diretrizes normativas. O procedimento incluiu:

- (i) Seleção e caracterização: as 13 pontes selecionadas foram severamente afetadas pelo evento hidrológico de abril–maio de 2024 (Tabela 4), e estavam inseridas em processos de avaliação técnica ou em projetos de reconstrução conduzidos em articulação entre os autores e órgãos públicos locais. A seleção não teve como objetivo compor uma amostra estatística aleatória, mas reunir casos com dados técnicos consistentes e comparáveis, incluindo levantamentos topobatimétricos, registros de danos com inspeções padronizadas, informações de projeto e interação com equipes técnicas envolvidas na reconstrução. Essa estratégia permitiu analisar estruturas submetidas a diferentes condições hidrológicas, geomorfológicas e hidráulicas, mantendo cada ponte como unidade de análise.
- (ii) Levantamentos de campo: realizaram-se inspeções sistemáticas de campo e levantamento de evidências físicas associadas aos mecanismos de falha. Foram avaliados indícios de erosão/socavação local, exposição ou descalçamento de fundações, acúmulo de detritos, danos em cabeceiras, danos à superestrutura e alterações/migração do leito. Esses registros foram complementados por levantamentos topográficos e batimétricos, utilizados para representar a geometria dos cursos d'água e subsidiar a modelagem hidráulica.
- (iii) Curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF): a caracterização hidrológica das bacias foi realizada a partir de séries pluviométricas e fluviométricas quando disponíveis, informações morfométricas, uso e cobertura do solo e dados de precipitação associados ao evento de 2024. Para cada região analisada, a frequência das precipitações máximas diárias foi avaliada com uma série pluviométrica principal, selecionada entre estações INMET/ANA conforme representatividade espacial, extensão temporal e consistência. Estações auxiliares vizinhas foram utilizadas para verificar a consistência das séries pelo método da dupla massa e para preencher falhas inferiores a 10%. As séries foram atualizadas com a maior extensão temporal disponível, incluindo eventos recentes, especialmente 2023 e 2024, e registros históricos extremos. As máximas diárias anuais foram ajustadas à distribuição GEV para TR de 2 a 450 anos, com desagregação subdiária para obtenção das curvas IDF (Basso *et al.*, 2016). Como nove pontes se situam próximas a SM, adotou-se a IDF atualizada dessa região para a maior parte das estruturas (Tassi *et al.*, 2026).
- (iv) Modelagem hidrológica: as vazões associadas ao evento de 2024 e aos cenários de projeto foram estimadas por modelagem chuva–vazão no HEC-HMS (USACE, 2024a), utilizando o método do Número da Curva (CN) para representação das perdas e o Hidrograma Unitário Triangular (HUT) para transformação chuva–vazão, em conformidade com procedimentos usualmente adotados em diretrizes nacionais e estaduais DNIT (2005) e IS-121/21 (DAER-RS). Os parâmetros foram definidos a partir das características físicas das bacias, do uso e cobertura do solo e das séries pluviométricas disponíveis. A calibração apoiou-se principalmente em evidências do evento de 2024, como marcas de cheia e informações de campo, e, quando disponíveis, em registros de vazão.
- (v) Modelagem hidráulica: a modelagem hidráulica foi conduzida no HEC-RAS (USACE, 2024b), em regime não permanente e unidimensional (1D), com o objetivo de estimar níveis d'água, velocidades médias e máximas, condições de submersão e padrões gerais de escoamento junto às travessias. A geometria do modelo foi construída a partir do modelo digital de terreno (MDT), levantamentos topográficos e batimétricos com refinamento junto às seções das pontes. Para a calibração do modelo ao evento de 2024, os resultados simulados foram comparados às marcas de cheia observadas em

campo, permitindo avaliar a coerência dos níveis estimados e reduzir incertezas na representação hidráulica do evento.

- (vi) Cenários de projeto e adaptação climática: foram considerados três grupos de cenários: o evento observado em 2024, o cenário normativo de projeto associado ao período de recorrência de 100 anos, e os cenários de adaptação climática indicados na Nota Técnica IPH-UFRGS, com períodos de recorrência de 350 ou 450 anos, conforme a área da bacia hidrográfica contribuinte à ponte. Para cada ponte, foram extraídos parâmetros hidráulicos e hidrológicos relevantes para a avaliação de desempenho, incluindo vazão, nível máximo da lâmina d'água, velocidade média, velocidade máxima local, altura livre disponível, grau de submersão e indícios de obstrução por detritos.
- (vii) Comparação normativa: a etapa final consistiu em confrontar os parâmetros estimados, os danos observados e os critérios normativos sistematizados nas Tabelas 1 a 3, permitindo avaliar em que medida os critérios vigentes representam os mecanismos hidráulico-estruturais observados em campo. A análise também subsidiou a identificação de lacunas normativas e a proposição de diretrizes técnicas para aumentar a resiliência de pontes frente a eventos hidrológicos extremos.
- (viii) Limitações metodológicas: algumas limitações incluem o fato de a modelagem 1D não representar integralmente efeitos hidráulicos locais complexos, como separação do escoamento, recirculação, fluxos transversais e interações tridimensionais junto a pilares, encontros e obstruções. Além disso, as estimativas hidrológicas por meio da modelagem chuva-vazão envolvem incertezas associadas à variabilidade espacial da precipitação, às condições de umidade antecedente, à parametrização do modelo, e à identificação de marcas de cheia (interpretação de vestígios físicos) que podem ter incertezas altimétricas de aproximada ± 40 cm. Também, não foi possível dispor, para todas as estruturas, de informações completas sobre idade, histórico de manutenção, estado de conservação, condições das fundações, conformidade normativa de projeto e construção, além de intervenções anteriores, que impedem isolar plenamente a contribuição de fatores normativos, construtivos e operacionais nos danos. Assim, as lacunas normativas identificadas devem ser interpretadas como fatores de vulnerabilidade potencial, e não como causa única ou suficiente dos colapsos observados.

5. Resultados e conclusões

Os resultados são apresentados nos itens subsequentes, de acordo com as dimensões analíticas sistematizadas nas Tabelas 1 a 3, de modo a confrontar, para cada critério normativo, as exigências vigentes, as lacunas identificadas e as evidências observadas nas 13 pontes analisadas. A Tabela 5 apresenta uma síntese dos principais parâmetros hidrológicos, hidráulicos e estruturais estimados para cada ponte, bem como o mecanismo predominante de dano observado em campo. Essa sistematização permite comparar, de forma integrada:

- (i) a vazão de projeto associada ao tempo de retorno de 100 anos (Q_{TR100});
- (ii) a vazão de adaptação às mudanças climáticas (Q_{TRAD}) e o respectivo tempo de retorno associado (TR_{Q-AD}) – conforme proposto pela Nota Técnica IPH-UFRGS;
- (iii) a vazão de pico do evento de 2024 (Q_{2024}) e o tempo de retorno estimado para esse evento (TR_{Q2024});
- (iv) velocidades máxima e média do escoamento na seção da ponte;
- (v) razão V_{max}/V_{med} ;
- (vi) altura de referência da ponte (H_{topo}), correspondente à altura vertical entre o talvegue no eixo da ponte e o topo do tabuleiro;
- (vii) grau de submersão; e
- (viii) mecanismo predominante de dano observado em campo.

Assim, a tabela constitui a base empírica para as discussões desenvolvidas nos itens seguintes.

5.1. Probabilidade de falha associada às vazões de projeto

A primeira dimensão avaliada refere-se à relação entre as vazões estimadas para o evento de 2024 e as vazões associadas aos critérios normativos de projeto. No Brasil, a escassez de séries fluviométricas nos locais de implantação de pontes dificulta a análise estatística direta das vazões máximas anuais e a

Tabela 5 • Síntese, por ponte, dos parâmetros hidrológicos, hidráulicos e estruturais estimados

ID	Q_{TR100} (m ³ /s)	Q_{TRAD} (m ³ /s)	TR_{Q-AD} (anos)	Q_{2024} (m ³ /s)	TR_{Q2024} (anos)	V_{max} (m/s)	$V_{méd}$ (m/s)	$\frac{V_{max}}{V_{méd}}$	H_{topo} (m)	Submersão (%)	Tipo de falha observada
1	3500,0	4200,0	450	3000,0	85,7	—	—	—	1,6	462	Movimento do tabuleiro
2	6800,6	8984,2	350	4605,9	67,7	3,84	1,68	2,28	7,0	83	Movimento do tabuleiro
3	7271,8	8841,1	350	2102,4	28,9	—	—	—	5,8	65	Movimento do tabuleiro
4	5595,9	7435,1	350	5491,0	98,1	6,19	4,03	1,54	3,8	282	Movimento do tabuleiro
5	341,2	494,7	450	205,2	60,1	3,75	3,40	1,10	3,6	18	Erosão local
6	827,1	1162,1	450	978,6	118,3	3,13	2,06	1,52	4,8	47	Erosão local
7	264,7	382,1	450	145,5	55,0	6,22	4,67	1,33	2,6	0	Erosão local
8	269,0	379,6	450	144,4	53,7	5,49	5,49	1,00	3,5	0	Erosão local
9	597,4	597,4	450	244,4	40,9	4,47	4,47	1,00	2,5	48	Erosão local
10	824,5	1194,7	450	308,5	37,4	2,35	2,35	1,00	2,5	0	Migração lateral do canal intensificada por detritos
11	1008,8	1460,8	450	362,1	35,9	4,30	4,30	1,00	1,9	55	Erosão local e por contração
12	1008,8	1460,8	450	362,1	35,9	3,48	3,48	1,00	1,6	108	Migração lateral do canal
13	3630,0	4952,6	450	2118,4	58,4	1,78	1,01	1,77	3,0	92	Erosão por contração intensificada por detritos

determinação do período de retorno da vazão (TR_Q), tornando frequente o uso de modelos chuva-vazão a partir de séries pluviométricas e características físicas das bacias hidrográficas (Costa, Nascimento & Guimarães, 2003; Castro, 2022), no qual a vazão determinada reflete o período de recorrência da precipitação (TR_P). Neste estudo, as vazões de projeto para as 13 pontes analisadas foram estimadas com base em modelos chuva-vazão, dada a indisponibilidade de dados de vazão junto às seções das pontes. Para isso, a precipitação de projeto foi obtida a partir da relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) atualizada por Tassi *et al.* (2026), que incorpora os eventos extremos de 1941, 2023 e 2024.

Nesse contexto, é importante mencionar que essa simples tomada de decisão em razão da disponibilidade de dados pode resultar em critérios diferentes, dada a distinção entre o período de recorrência TR_Q e TR_P . Mesmo quando as séries históricas de chuva e vazão abrangem o mesmo intervalo temporal, seus períodos de recorrência não são necessariamente equivalentes, pois a vazão representa uma resposta hidrológica da bacia à precipitação. Essa resposta é condicionada por fatores como duração e distribuição temporal da chuva, variabilidade espacial da precipitação, umidade antecedente do solo, uso e cobertura da terra, capacidade de armazenamento da bacia, tempo de concentração e propagação da cheia (Sivapalan *et al.*, 2005; Viglione, Merz & Blöschl, 2009).

Em Santa Maria, por exemplo, o evento de precipitação do ano de 2024 resultou em um volume acumulado de 450 mm em quatro dias, cujo período de recorrência (TR_P) foi estimado em 300 anos (Tassi *et al.*, 2026). Já o volume acumulado de precipitação em 24 horas resultou em um TR_P da ordem de 35 anos, indicando que a excepcionalidade do evento esteve ligada principalmente à persistência da precipitação ao longo de vários dias. A modelagem chuva-vazão realizada para as 13 pontes indicou que o período de recorrência das vazões máximas estimadas para o evento de 2024 (TR_Q) foi, em média, da ordem de 60 anos (Tabela 5), valor inferior ao período de recorrência da precipitação regional (TR_P). Além disso, quando comparadas às vazões normativas de projeto, obtidas a partir de uma chuva de 100 anos (Q_{TR100}), as vazões estimadas para o evento de 2024 (Q_{2024}) foram inferiores em 12 das 13 pontes analisadas.

A magnitude dessa diferença, entretanto, não foi homogênea entre as estruturas analisadas. Observou-se uma forte correlação positiva entre a área de drenagem das bacias e a diferença absoluta entre a vazão normativa de projeto e a vazão estimada para o evento de 2024 ($Q_{TR100} - Q_{2024}$) com coeficiente de correlação de Pearson da ordem de 0,94. As maiores discrepâncias ocorreram nas pontes localizadas em bacias de maior área, como Cacequi, São Vicente e Invernadinha, nas quais a Q_{TR100} foi substancialmente superior à Q_{2024} . Esse padrão indica que, em bacias maiores, o cenário normativo baseado em uma chuva crítica de 100 anos de recorrência tende a produzir vazões de pico mais elevadas do que aquelas simuladas para o evento observado de 2024.

Esse comportamento é coerente com a dinâmica hidrológica de bacias de maior porte, nas quais a

vazão de pico é fortemente influenciada pela distribuição espacial da precipitação, pela propagação da onda de cheia, pelo armazenamento na rede de drenagem e pela defasagem temporal entre contribuições de diferentes subáreas. Assim, embora o evento de 2024 tenha sido excepcional em termos de volume acumulado e persistência da precipitação, sua resposta em termos de vazão máxima não foi equivalente ao cenário de projeto de 100 anos de recorrência. Em bacias menores, por outro lado, a resposta hidrológica tende a ser mais rápida e mais sensível à intensidade local da precipitação e às condições antecedentes de umidade, o que pode reduzir a diferença entre a Q_{TR100} e a Q_{2024} .

Os resultados indicam que a área de drenagem é um fator relevante para interpretar a diferença entre a vazão de projeto normativa e a vazão estimada para um evento extremo observado. Essa constatação reforça que a severidade hidráulica de uma cheia não deve ser avaliada apenas pela recorrência da precipitação regional ou pela vazão de pico isolada, mas também pela escala da bacia, pelo tempo de resposta hidrológica e pela forma do hidrograma.

É importante destacar também que as vazões de projeto foram estimadas com base em curvas IDF atualizadas, que já incorporam eventos extremos recentes na região, incluindo 1941, 2023 e 2024. O uso de curvas IDF anteriores a esses eventos provavelmente resultaria em menores intensidades de precipitação e, portanto, em menores vazões de projeto. Além disso, a própria estimativa do período de recorrência do evento de 2024 seria alterada, possivelmente indicando uma raridade estatística maior do que aquela obtida com a série atualizada. Portanto, a comparação entre Q_{TR100} e Q_{2024} depende diretamente da atualização das séries pluviométricas utilizadas na construção das curvas IDF.

5.2. Adaptação climática e mudanças no uso do solo

A Nota Técnica IPH-UFRGS (Paiva *et al.*, 2024) propõe atualizar os períodos de retorno utilizados na definição dos eventos de projeto com base em séries pluviométricas recentes e eventos extremos históricos, recomendando o critério mais conservador entre a majoração da precipitação/vazão e do TR de projeto. Para obras usualmente dimensionadas com $TR = 100$ anos, como as pontes rodoviárias, o documento sugere a adoção de $TR = 450$ anos para bacias com área de contribuição igual ou inferior a 1.000 km² e $TR = 350$ anos para bacias superiores a 1.000 km², com o objetivo de aumentar a resiliência das estruturas frente às mudanças climáticas.

Como discutido no item anterior, as maiores diferenças entre a vazão normativa de projeto e a vazão do evento de 2024 ocorreram nas bacias de maior área. Assim, a adoção de períodos de retorno diferenciados por área, como proposto pela Nota Técnica, constitui um avanço importante em relação à aplicação uniforme de um único TR de projeto. Entretanto, essa abordagem ainda permanece essencialmente baseada em análise de frequência e na atualização estatística de séries pluviométricas. Dessa forma, não incorpora explicitamente processos de não estacionariedade hidrológica, mudanças no uso e cobertura do solo e alterações progressivas na resposta das bacias ao longo do tempo (Sharma *et al.*, 2021; Jiménez, Peña & López, 2022). Esse aspecto é particularmente relevante porque a transformação chuva-vazão depende não apenas da magnitude da precipitação, mas também das condições antecedentes de umidade, da capacidade de infiltração, da conectividade hidrológica e das transformações territoriais da bacia (Milly *et al.*, 2008; Beven, 2012).

No caso da ponte de Santiago, por exemplo, foi identificada uma série histórica de vazões entre 1958 e 2024 em estação fluviométrica localizada a cerca de 15 km a jusante da seção da ponte. Essa série indicou tendência de aumento das vazões máximas anuais, com eventos de precipitação com características pluviométricas comparáveis gerando vazões progressivamente superiores a partir do final da década de 1990. Esse comportamento sugere alteração na resposta hidrológica da bacia. No mesmo período, observou-se expansão expressiva da área agrícola a montante, especialmente associada ao cultivo de soja, conforme os dados do MapBiomas (Figura 3). Tendência semelhante foi identificada na bacia da ponte de São Vicente, onde a calibração hidrológica necessária para representar a cheia de 2024, em comparação com eventos anteriores, exigiu um aumento de aproximadamente 23% no valor do CN. Esse ajuste é compatível com a mudança da cobertura da bacia, que passou de predominância de formações campestres ($\approx 80\%$ em 1995) para maior participação de soja ($\approx 43\%$ em 2023).

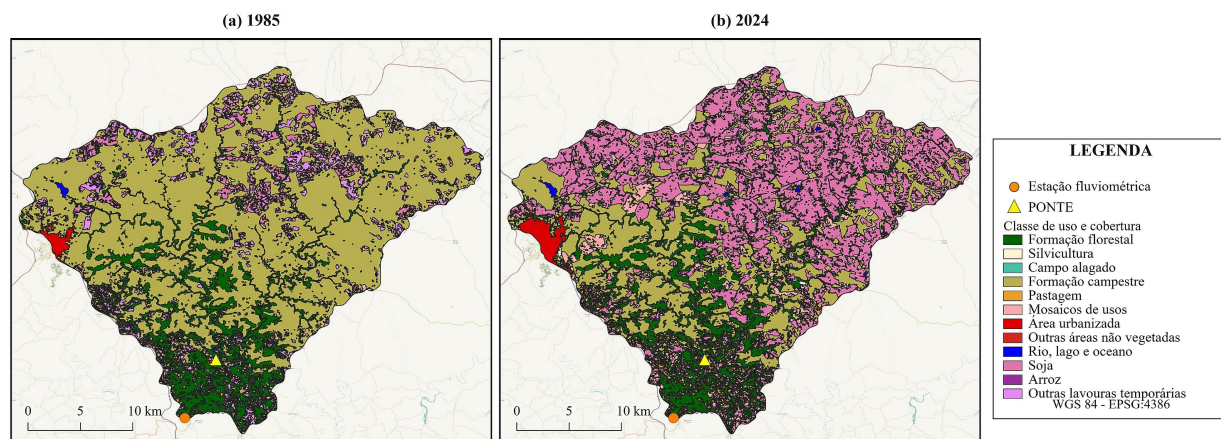


Figura 3 • Comparação do uso e ocupação da terra entre 1985 e 2024 na bacia da ponte do Santiago, adaptado de MapBiomias (2024)

Esses resultados indicam que mudanças no uso e cobertura do solo podem alterar a capacidade de infiltração, o armazenamento superficial e a conectividade hidrológica das bacias, modificando a relação entre precipitação e vazão ao longo do tempo. Assim, procedimentos baseados exclusivamente em séries históricas podem subestimar condições futuras de escoamento. Para o projeto e a gestão de pontes, a bacia deve ser tratada como um sistema dinâmico, sujeito a transformações climáticas e territoriais capazes de alterar a geração de vazão, as velocidades de escoamento e as solicitações hidráulicas sobre as estruturas, conforme sintetizado nas Tabelas 6 a 8.

5.3. Limitações da modelagem hidrológica normativa

Na ausência de séries fluviométricas representativas na seção de interesse ou em postos próximos, a estimativa de vazões de projeto costuma recorrer a modelos chuva-vazão, conforme previamente discutido. Nesse caso, a IS-121/2021 do DAER-RS orienta a estimativa das vazões de projeto com base em séries pluviométricas superiores a 30 anos e no uso de equações de tempo de concentração compatíveis com as características físicas da bacia. Para a transformação chuva-vazão em bacias de porte intermediário (entre 10 e 1.000 km²), indica-se a aplicação do método do CN para estimativa de perdas, combinado ao HUT para a geração de escoamento superficial.

Embora esses procedimentos sejam amplamente utilizados em estudos de drenagem e projetos de obras hidráulicas, eles apresentam limitações quando aplicados a eventos extremos, especialmente em bacias não monitoradas ou com poucos dados de calibração. Modelos evento-baseados do tipo chuva-vazão dependem de escolhas metodológicas que influenciam diretamente a vazão estimada, como duração e distribuição temporal da chuva de projeto, método de perdas, umidade antecedente, tempo de concentração e forma do hidrograma unitário. Estudos recentes mostram que essas estimativas podem ser altamente sensíveis a essas escolhas, e que a equivalência entre o período de retorno da chuva e o período de retorno da vazão nem sempre é válida (Vangelis *et al.*, 2022). No caso da normativa analisada, essas limitações tornam-se relevantes porque não são definidos procedimentos específicos para bacias superiores a 1.000 km², não há exigência de calibração ou validação dos modelos hidrológicos e a umidade antecedente, a forma do hidrograma e a duração das cheias são tratadas de forma limitada. Além disso, a utilização de uma chuva sintética de projeto tende a privilegiar a estimativa da vazão de pico, enquanto eventos extremos reais podem produzir danos associados também ao volume escoado, à persistência de níveis elevados e ao tempo de exposição das fundações e encontros às solicitações hidráulicas. A literatura tem reforçado que a análise de cheias pode demandar abordagem multivariada, considerando não apenas a vazão máxima, mas também o volume e a duração do hidrograma (Salvadori & De Michele, 2004; De Michele *et al.*, 2005), especialmente em estudos voltados à erosão e à segurança de pontes (Lacko *et al.*, 2022).

A ponte Giacomini (ID 10 na Figura 2) ilustra essa limitação. Para o evento de 2024, a vazão de pico estimada foi cerca de oito vezes inferior à vazão do cenário normativo (TR = 100 anos), enquanto o volume escoado foi aproximadamente 3,7 vezes superior ao do hidrograma de projeto. Esse resultado indica que, embora o evento observado não tenha produzido a maior vazão de pico entre os cenários avaliados, gerou uma cheia mais volumosa e persistente. Em termos de desempenho estrutural, essa condição pode aumentar a duração das solicitações sobre encontros e fundações, favorecer a saturação dos aterros de aproximação, prolongar processos erosivos e intensificar a instabilidade de margens e leitos.

Para o projeto e a verificação de pontes, recomenda-se que a modelagem hidrológica incorpore, sempre que possível, calibração com eventos observados, análise de sensibilidade dos parâmetros, avaliação das condições antecedentes de umidade e caracterização do hidrograma em termos de pico, volume e duração. Essa abordagem permitiria representar melhor as solicitações impostas às estruturas e reduzir a dependência de critérios prescritivos baseados apenas em períodos de retorno e vazões máximas.

5.4. Modelagem hidráulica e representação do escoamento

A modelagem hidráulica permite avaliar níveis d'água, velocidades médias e máximas, remansos, condições de submersão, solicitações hidrodinâmicas em pontes e potenciais zonas de erosão localizada (Tonin & Paiva, 2022). Esses parâmetros são essenciais para interpretar o desempenho hidráulico-estrutural das travessias, pois os mecanismos de dano observados em campo estão associados à interação entre o escoamento, a geometria da ponte, com os pilares, encontros, aterros de aproximação, planícies de inundação e eventuais obstruções por detritos. Nesse contexto, modelos de livre acesso, como o HEC-RAS, permitem tanto a análise unidimensional, para trechos com escoamento predominantemente longitudinal, quanto bidimensional, quando há planícies de inundação, contrações hidráulicas, geometrias irregulares ou concentração local de velocidades.

A IS-121/2021 do DAER-RS, porém, não exige a modelagem hidráulica completa, restringindo-se ao cálculo da velocidade média pela equação de Manning, sob hipótese de escoamento uniforme. Essa simplificação apresenta limitações importantes quando aplicada no caso das pontes, pois não são avaliados os fenômenos previamente mencionados e as interferências provocadas pela existência da própria estrutura (Trueheart et al., 2020).

Dessa forma, recomenda-se que a análise inclua, no mínimo, a representação de escoamento gradualmente variado e, quando necessário, modelagem bidimensional (Robinson et al., 2019; Trueheart et al., 2020). A escolha entre modelos 1D, 2D ou acoplados deve ser justificada em função da escala da bacia, da complexidade geomorfológica, da disponibilidade de dados topobatimétricos, da presença de estruturas interferentes e dos objetivos da análise (Huizinga, 2007; Pinos & Timbe, 2019). As Tabelas 6 a 8 sintetizam recomendações para incorporar modelagens hidráulicas mais robustas ao projeto, verificação e gestão de pontes.

5.5. Velocidades locais e desuniformidade do escoamento

A adoção exclusiva de velocidades médias ($V_{\text{méd}}$), frequentemente estimadas por formulações simplificadas como a equação de Manning, pode mascarar condições críticas localizadas em situações de escoamento não uniforme. Mesmo quando a vazão estimada para o evento não supera a vazão normativa de projeto, a concentração do fluxo na calha principal, a contração hidráulica da seção, a submersão parcial ou total da superestrutura e a retenção de detritos podem produzir velocidades locais significativamente superiores à velocidade média da seção.

Essa limitação é particularmente relevante em pontes, pois os esforços hidrodinâmicos e o potencial erosivo não dependem apenas da vazão total, mas também da distribuição espacial das velocidades junto a pilares, encontros, aterros de aproximação e margens. Como as ações hidrodinâmicas variam proporcionalmente ao quadrado da velocidade ($p = k v_a^2$, na Tabela 2), pequenas diferenças entre

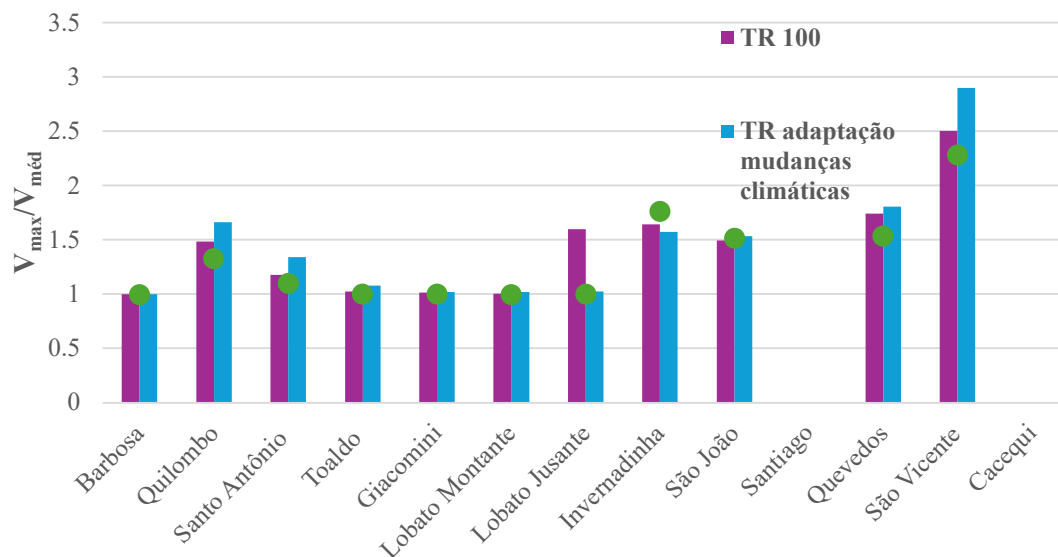


Figura 4 • Comparação do índice $V_{\max}/V_{\text{méd}}$ entre o evento de 2024 e cenários de projeto (TR = 100 anos) e os cenários de adaptação climática (TR = 350 e 450 anos). Pontes organizadas em ordem crescente de área de contribuição.

velocidade média e velocidade local podem resultar em diferenças expressivas nas solicitações atuantes e na capacidade erosiva do escoamento.

A Figura 4 apresenta, para as pontes analisadas, a razão entre a velocidade máxima na calha principal e a velocidade média da seção ($V_{\max}/V_{\text{méd}}$), para o evento de 2024, para o cenário normativo de TR de 100 anos e os cenários que incorporam o TR de 350 ou 450 anos prevendo adaptações às mudanças climáticas (TRAD). Essa razão é um indicador da desuniformidade do escoamento e da concentração espacial de energia hidráulica.

Em diversas estruturas, a utilização isolada de $V_{\text{méd}}$ pode subestimar tanto os esforços hidrodinâmicos quanto o potencial erosivo em condições de escoamento desuniforme. Na ponte de São Vicente, por exemplo, a relação $V_{\max}/V_{\text{méd}}$ foi superior a 2, condição considerada crítica em avaliações hidráulicas de pontes (Arneson et al., 2012), pois implica solicitações locais potencialmente até quatro vezes maiores do que aquelas estimadas com base apenas na velocidade média, em razão da dependência quadrática entre força hidrodinâmica e velocidade.

A Figura 5 apresenta as velocidades máximas estimadas na calha principal junto às seções das pontes analisadas, considerando o evento de 2024, o cenário de projeto e os cenários de adaptação climática. Exceto nas pontes Invernadinha e Cacequi, as demais estruturas apresentaram velocidades superiores ao intervalo de referência 2 a 3 m.s⁻¹, frequentemente indicado em referências nacionais clássicas para avaliações hidráulicas associadas a pontes e canais naturais (Pfeil, 1979; Marchetti, 2008; Mendes, 2017; Araújo, 2018).

Em vários casos, as velocidades superaram 5 m.s⁻¹, valor indicado no Álbum de Projetos-Tipo de Pontes Semipermanentes (DNIT, 2023). Na ponte de Quevedos, os valores excederam 7 m.s⁻¹. Essas magnitudes ultrapassam limites usualmente associados a canais revestidos em concreto (≈ 4 a 5 m.s⁻¹) (DNIT, 2006), e aproximam-se ou superam valores típicos admissíveis para canais em rocha resistente (≈ 6 m.s⁻¹) (USACE, 1991).

Os resultados reforçam que a avaliação hidráulica de pontes não deve se limitar à velocidade média da seção. Velocidades máximas locais elevadas podem intensificar processos erosivos junto a pilares, encontros, margens e aterros de aproximação, além de ampliar os esforços hidrodinâmicos sobre a estrutura, especialmente em condições de submersão ou acúmulo de detritos.

Recomenda-se, portanto, que o projeto e a verificação hidráulica de pontes incorporem, além da vazão de projeto e da velocidade média, a estimativa de velocidades máximas locais e de índices de desuniformidade do escoamento, como $V_{\max}/V_{\text{méd}}$, de modo a identificar zonas críticas de concentração de energia hidráulica e subsidiar medidas de proteção, reforço e inspeção preventiva, conforme sintetizado nas Tabelas 6 a 8.

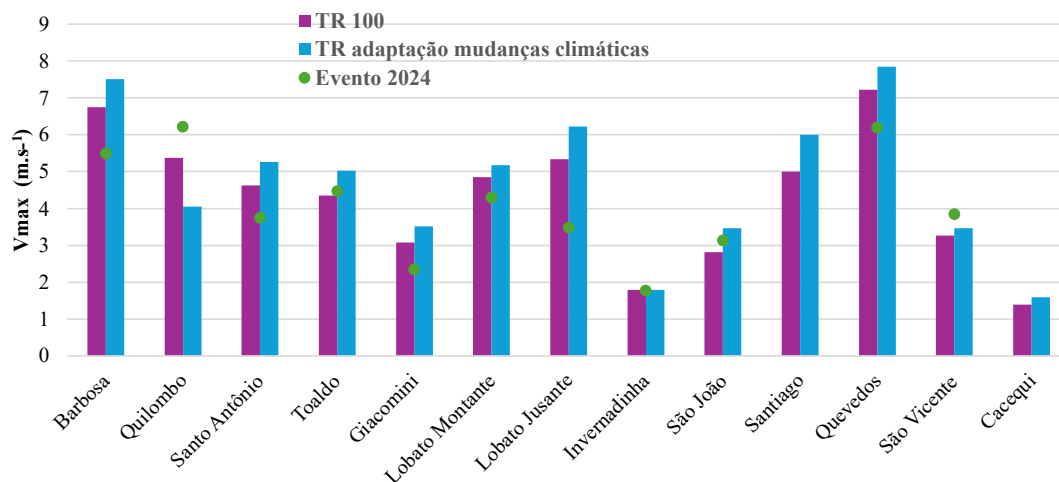


Figura 5 • $V_{\max}$ na calha principal do rio, nas proximidades das pontes analisadas, para o evento de 2024, o cenário de projeto atual (TR = 100 anos) e os cenários de adaptação climática (TRAD = 350 e 450 anos).

5.6. Processos erosivos

O processo erosivo inicia-se quando as tensões de arraste exercidas pelo escoamento superam a resistência do leito, das margens ou dos materiais de proteção. Sua evolução depende não apenas da magnitude da vazão e da velocidade do escoamento, mas também da duração da cheia, da persistência de níveis elevados, da granulometria do leito, da estabilidade das margens, da geometria da seção e da presença de interferências hidráulicas, como pilares, encontros, aterros de aproximação e detritos acumulados (USACE, 1991; DNIT, 2006; Arneson *et al.*, 2012).

A análise das 13 pontes afetadas pelo evento extremo de 2024 mostrou que 77% das estruturas apresentaram algum tipo de processo erosivo associado aos danos observados. Foram observados processos de erosão local, por contração e migração lateral do canal.

A erosão local, ou socavação, foi o mecanismo mais recorrente, identificada em 10 pontes, sobretudo junto a pilares, encontros e fundações. Esse processo esteve associado à intensificação de turbulência, à formação de vórtices e à aceleração local do escoamento, com velocidades máximas estimadas entre aproximadamente $2,0$ e $6,2 \text{ m.s}^{-1}$, nas estruturas afetadas (Figura 6a).

Além da erosão local, foram observados processos complementares de erosão por contração e migração lateral do canal. A erosão por contração ocorreu em 4 pontes (31%), associada ao estreitamento da seção hidráulica imposto pela ponte, à concentração do fluxo na calha principal e ao aumento das velocidades junto às cabeceiras. Esse mecanismo tende a ser intensificado em travessias com seção hidráulica insuficiente, aterros de aproximação avançando sobre a planície de inundação ou obstruções parciais por detritos.

A migração lateral do canal foi predominante em 2 pontes (15%), envolvendo deslocamento da calha principal, instabilidade de margens e comprometimento dos aterros de encontro. Na ponte Giacomini, por exemplo, embora a velocidade máxima estimada seja da ordem de $2,3 \text{ m.s}^{-1}$, o redirecionamento do fluxo após obstruções intensificou os processos erosivos nos encontros, indicando que a severidade do dano depende não apenas da magnitude da velocidade, mas também da direção do escoamento, da duração da solicitação e da interação entre morfologia fluvial e geometria da ponte (Figura 6b).

Embora possam ocorrer isoladamente, os mecanismos erosivos diagnosticados tendem a se combinar durante eventos extremos, produzindo processos em cadeia que ampliam a instabilidade de pilares, encontros e aterros de aproximação (Arneson *et al.*, 2012; Castaneda Galvis, 2023; Steinritz *et al.*, 2024). Nesse contexto, a erosão em pontes deve ser interpretada como um processo hidromorfológico, condicionado pela interação entre velocidades locais, duração da cheia, saturação do solo, geometria da travessia, obstruções por detritos e estabilidade do canal. Assim, avaliações baseadas apenas na vazão de pico ou na velocidade média podem subestimar mecanismos erosivos relevantes, especialmente em eventos extremos prolongados. Recomenda-se, portanto, que o projeto e a verificação de pontes incorporem

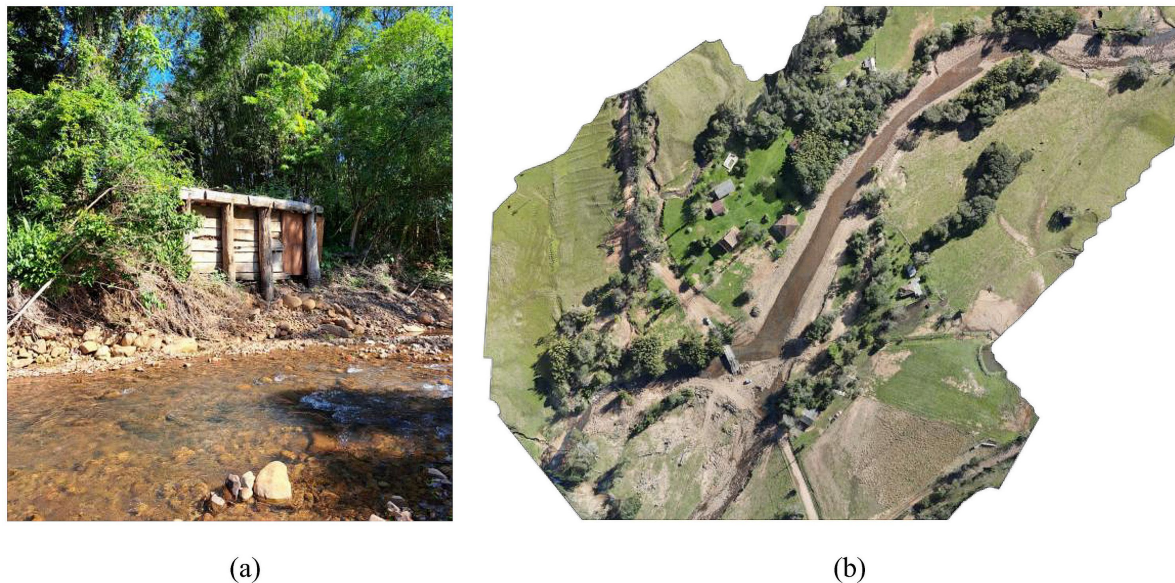


Figura 6 • Diferentes tipos de erosão após o evento de 2024 nas pontes de: (a) Erosão local, ponte Toaldo, $V_{\max} = 4,5 \text{ m.s}^{-1}$; (b) Erosão por contração e migração lateral do canal, ponte Giacomini, $V_{\max} = 2,3 \text{ m.s}^{-1}$.

critérios específicos para erosão local, erosão por contração e instabilidade lateral do canal, conforme sintetizado nas Tabelas 6 a 8.

5.7. Detritos e obstrução hidráulica

O acúmulo, transporte e impacto de detritos em pontes podem intensificar as solicitações hidráulicas e estruturais durante eventos extremos. Neste estudo, o termo “detritos” abrange material lenhoso flutuante, sedimentos grosseiros, blocos, matações e elementos antropogênicos mobilizados pelo escoamento. Esses materiais podem atuar de forma combinada por meio de três mecanismos principais: (i) obstrução hidráulica, com elevação do nível a montante, concentração de velocidades e agravamento da socavação; (ii) cargas impulsivas decorrentes do impacto de troncos, blocos ou outros objetos transportados; e (iii) efeitos morfodinâmicos associados à abrasão, ao transporte sólido intenso e à alteração dos padrões locais de escoamento (Bradley, Richards & Bahner, 2005; Palermo, Pagliara & Roy, 2021; Majtan, Cunningham & Rogers, 2021).

A NBR 7187:2021 (ABNT, 2021) aborda parcialmente esse problema ao prever pressões associadas ao acúmulo de detritos ($p = 0,71 v_a^2$ na Tabela 2). Entretanto, a norma não trata de forma explícita as cargas de impacto, os efeitos morfodinâmicos do transporte sólido, a intensificação da erosão local e por contração, nem do aumento de esforços laterais decorrentes do bloqueio parcial da seção hidráulica.

Nas pontes analisadas (Figura 6), as evidências de campo indicaram que os detritos não atuaram apenas como carga superficial aplicada à estrutura. A baixa altura livre, o pequeno espaçamento entre pilares, a submersão parcial ou total da estrutura e a elevada disponibilidade de biomassa e material mobilizável favoreceram a formação de obstruções progressivas. Esse processo pode ser interpretado como uma falha em cascata: (a) inicialmente ocorre a retenção de troncos e galhadas nos apoios; (b) em seguida a barreira é adensada por detritos menores, sedimentos e material antropogênico; (c) posteriormente há elevação do nível d’água a montante e aumento do gradiente hidráulico; e (d) por fim, o fluxo é redirecionado, intensificando velocidades locais, socavação em encontros e fundações, e instabilidade nos aterros de aproximação.

Assim, o projeto e a gestão de pontes devem incorporar critérios específicos para avaliar risco de obstrução, disponibilidade de material mobilizável, altura livre, espaçamento entre apoios e estratégias de inspeção e remoção preventiva. Diretrizes para incorporar esses efeitos ao projeto e à manutenção constam nas Tabelas 6 a 8.

5.8. Altura livre e submersão da superestrutura

A altura livre corresponde à distância vertical entre o nível máximo previsto da lâmina d'água e a face inferior da superestrutura. Sua função é garantir uma folga hidráulica mínima durante eventos de cheia, reduzindo a probabilidade de contato direto do escoamento e dos detritos transportados com o tabuleiro, vigas e demais elementos estruturais da ponte (USACE, 1991; Zevenbergen *et al.*, 2012).

Quando a lâmina d'água atinge a superestrutura, as solicitações hidráulicas deixam de estar associadas apenas ao escoamento sob a ponte e passam a incluir empuxo de flutuação, forças horizontais de arrasto, impactos de detritos e aumento da contração hidráulica. Essa condição pode elevar de forma não linear os esforços atuantes, acelerar o escoamento junto ao leito, intensificar a socavação por contração e favorecer o deslocamento ou colapso da superestrutura, especialmente quando associada a obstruções por detritos e à persistência de níveis elevados.

A IS-121/2021 não estabelece diretrizes específicas para a definição da borda livre mínima em pontes. Algumas normativas estaduais brasileiras sugerem margens de segurança entre 1,0 m e 1,5 m, conforme o DER-SP (2006), em São Paulo, e Araújo (2018), no Tocantins. Contudo, nas estruturas avaliadas, esses valores mostraram-se insuficientes frente ao evento de 2024. A Figura 7 evidencia a diferença entre as alturas máximas da água no evento de 2024 (H_{2024}) e a altura de referência da ponte (H_{topo}), definida como a altura vertical entre o talvegue no eixo da ponte e o topo do tabuleiro. Cerca de 85% das pontes analisadas operaram sob submersão total, com excedências estimadas entre 18% e 460%, condição associada ao deslocamento ou colapso da superestrutura em diversos casos.

Os resultados indicam que a altura livre não deve ser tratada apenas como um critério geométrico fixo. Sua efetividade depende das condições hidráulicas do evento, incluindo remanso, obstrução parcial da seção por detritos, submersão da superestrutura, contração do escoamento e elevação dos níveis a montante. Assim, a definição da borda livre deve considerar não apenas a vazão de projeto, mas também cenários de adaptação climática, acúmulo de detritos, efeitos de remanso e incertezas associadas à modelagem hidrológica-hidráulica.

Além disso, a preservação do tabuleiro não garante, isoladamente, a funcionalidade da travessia. Em muitos casos, a inundação ou erosão dos aterros de aproximação pode interromper o acesso antes mesmo que a superestrutura seja comprometida. Dessa forma, o dimensionamento hidráulico de pontes deve ser integrado à análise dos acessos, encontros, taludes e planícies de inundação, de modo a avaliar tanto a segurança estrutural quanto a continuidade operacional da ligação viária. Diretrizes para esse dimensionamento integrado constam nas Tabelas 6 a 8.

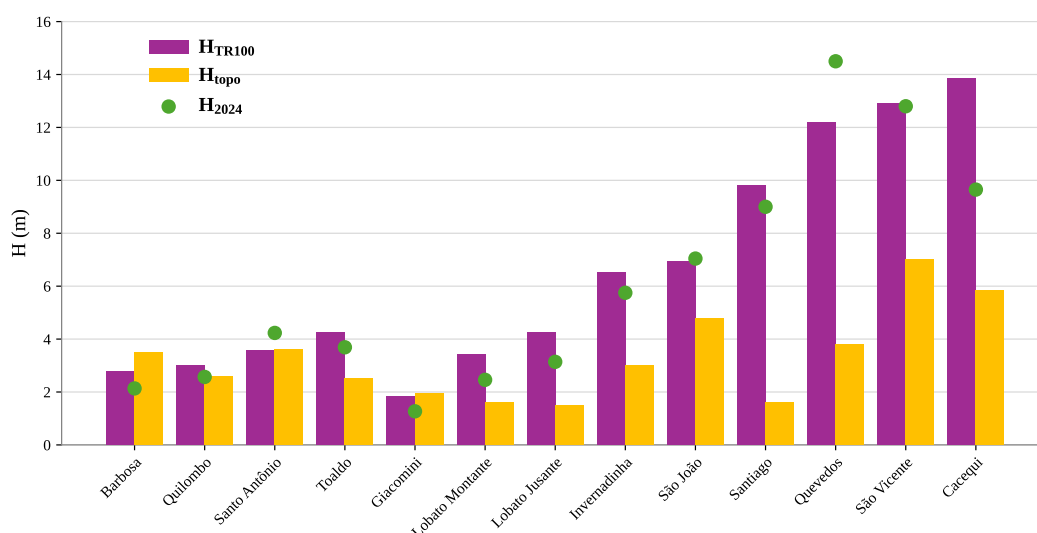


Figura 7 • Comparação entre as alturas máximas da água no evento de 2024 (H_{2024}) e no cenário TR = 100 anos (H_{TR100}), em relação à altura de referência da ponte (H_{topo})

5.9. Inspeção preventiva e gestão de risco

A avaliação estrutural de pontes deve incorporar medidas preventivas adequadas à intensificação de eventos extremos, especialmente em sistemas fluviais dinâmicos, onde erosão, exposição de fundações, instabilidade de margens, obstruções por detritos e degradação de proteções hidráulicas podem evoluir para condições críticas ao longo do tempo (Devendiran, Banerjee & Mondal, 2020). No Brasil, a DNIT 010/2024 – PRO estabelece diretrizes para inspeções em campo, incluindo a verificação de detritos acumulados, alterações na seção de escoamento, erosão no leito e nas margens, exposição de fundações e integridade de dispositivos de proteções contra socavação (DNIT, 2024). Embora represente avanço ao reconhecer a relevância desses mecanismos, a norma ainda não contempla critérios explícitos de priorização por risco hidrológico-hidráulico, nem orientações para ajustar a frequência de inspeção em função de mudanças climáticas, histórico de eventos extremos, vulnerabilidade geomorfológica da bacia ou evidências de instabilidade progressiva.

Nas pontes analisadas, mecanismos como erosão progressiva em cabeceiras e instabilidade de enrocamentos apresentavam indícios prévios que poderiam ter sido identificados por monitoramento sistemático. Os resultados reforçam que a inspeção preventiva deve ser integrada à gestão do risco hidrológico-hidráulico, incorporando não apenas a condição estrutural da ponte, mas também a evolução do leito, margens, encontros, aterros de aproximação, proteções contra socavação e acúmulo de detritos. Recomenda-se que pontes com baixa altura livre, histórico de submersão, evidências de erosão ou obstruções recorrentes sejam priorizadas em programas de monitoramento, manutenção preventiva e inspeção pós-evento, conforme sintetizado nas Tabelas 6 a 8.

5.10. Quadro síntese: diretrizes de aprimoramento identificadas a partir da análise

As Tabelas 6 a 8 consolidam as diretrizes de aprimoramento identificadas a partir da comparação entre os critérios normativos vigentes, os parâmetros hidrológico-hidráulicos estimados e os mecanismos de dano observados nas pontes analisadas, para as três dimensões analisadas: (a) critérios hidrológicos, (b) critérios hidráulicos e (c) procedimentos de inspeção e manutenção preventiva. Diferentemente das Tabelas 1 a 3, que sistematizam as lacunas normativas previamente identificadas, as Tabelas 6 a 8 apresentam uma síntese propositiva, orientada à incorporação desses mecanismos no projeto, na verificação, na inspeção e na gestão de pontes expostas a cheias extremas.

Tabela 6 • Diretrizes técnicas, referências internacionais e aplicações práticas para projeto, avaliação e gestão resiliente de pontes frente a eventos hidrológicos extremos: critérios hidrológicos

Item	Orientação técnica	Referências internacionais	Aplicação prática
Probabilidade de falha / TR	Adotar abordagens integradas baseadas em desempenho e risco — o TR estatístico isolado é insuficiente; combinar adaptação climática, processos erosivos, fundação, manutenção e interação hidráulica local.	Wardhana & Hadipriono (2003); HEC-20 (Lagasse <i>et al.</i> , 2012); Zevenbergen <i>et al.</i> (2012); AASHTO (2020); Cerema (2019)	Justificar o TR adotado com análise de vulnerabilidade e consequências da falha. Avaliar a severidade pela escala da bacia, tempo de resposta e forma do hidrograma, não apenas pela vazão de pico.
Adaptação climática e uso do solo	Atualizar estudos após novos extremos, mudanças no manejo do solo da bacia ou revisão das IDF; adotar margens de segurança conforme risco e desempenho esperado.	Nemry & Demirel (2012); Asam <i>et al.</i> (2015); Sharma <i>et al.</i> (2021)	Registrar incertezas e medidas adotadas; tratar a bacia como sistema dinâmico. Considerar o efeito das mudanças no uso do solo sobre infiltração, armazenamento e geração de vazão ao longo do tempo.
Modelagem hidrológica	Usar métodos compatíveis com a escala da bacia e a disponibilidade de dados, complementando métodos simplificados (CN/HUT) com calibração, validação e análise de sensibilidade dos parâmetros. Adotar abordagem multivariada (pico, volume e duração) e não apenas o pico; explicitar umidade antecedente e forma do hidrograma.	Viglione, Merz & Blöschl (2009); Yang <i>et al.</i> (2021); Castaneda Galvis (2023)	Sobretudo para bacias >1.000 km ² ou eventos prolongados, avaliar volume e duração além do pico.

Tabela 7 • Diretrizes técnicas, referências internacionais e aplicações práticas para projeto, avaliação e gestão resiliente de pontes frente a eventos hidrológicos extremos: critérios hidráulicos

Item	Orientação técnica	Referências internacionais	Aplicação prática
Modelagem hidráulica	Adotar modelagem compatível com a complexidade do sítio, capaz de representar remanso, perdas localizadas, obstruções, velocidades locais, submersão e o efeito da ponte. Usar 1D em trechos longitudinais e 2D (ou 1D/2D acoplada) em planícies de inundação, contrações ou geometria irregular.	FHWA (2019); Robinson <i>et al.</i> (2019); Cerema (2019); AASHTO (2020).	Apresentar mapas de profundidade e V_{max} , considerando remanso e a interferência de múltiplas estruturas. Definir 1D/2D em função da escala, geomorfologia, dados topobatimétricos e estruturas interferentes; registrar calibração/validação.
Velocidade de escoamento	Avaliar V_{max} (não apenas V_{med}) como variável de suporte, e não como critério isolado de falha, integrando-a às análises de erosão, estabilidade geomorfológica e pressões hidrodinâmicas, preferencialmente por modelagem 2D, avaliando os campos de velocidade (magnitude e direção).	USACE EM 1110-2-1601 (USACE, 1991); FHWA (2019); FHWA-HIF-19-061 (Robinson <i>et al.</i> , 2019); AASHTO (2020).	Extraír as velocidades locais da modelagem 2D como insumo para análises de erosão, socavação, estabilidade geomorfológica e pressões hidrodinâmicas, e não como critério independente. Atentar às combinações críticas de velocidade e profundidade junto a pilares, encontros e contrações. Sob submersão da superestrutura, considerar também as forças de fluxo pressurizado, como arrasto, sustentação e empuxo.
Erosão	Interpretar a erosão como processo hidromorfológico, condicionado por velocidades locais, duração da cheia, saturação do solo, geometria da ponte, detritos e pela dinâmica do canal (incisão, agradação e migração lateral), tratada como condição de contorno das análises de socavação. Avaliar de forma sistemática a socavação em pilares, fundações e encontros da ponte, combinando modelagem hidráulica 2D, análise geotécnica da resistência dos solos aos esforços cisalhantes, fundações adequadas e proteções; adotar margens conservadoras em métodos empíricos.	USACE EM 1110-2-1601 (USACE, 1991); HEC-18 (Arneson <i>et al.</i> , 2012); HEC-20 (Lagasse <i>et al.</i> , 2012); FHWA (2012, 2019); Cerema (2019); FHWA-HIF-19-061 (Robinson <i>et al.</i> , 2019); Steinritz <i>et al.</i> (2024); AASHTO (2020).	Estimar a socavação total (degradação de longo prazo, contração, socavação local em pilares e encontros) com equações alimentadas por campos hidráulicos de modelagem 2D, e não por escoamento uniforme. Caracterizar a tendência evolutiva do canal (incisão, agradação ou estabilidade) e a atividade de migração lateral, incorporando-a à estimativa da degradação de longo prazo. Dimensionar fundações e proteções para a socavação potencial, considerando a vulnerabilidade geotécnica dos solos e das margens.
Detritos	Tratar detritos como obstrução, carga de impacto e fator de agravamento da socavação, com efeitos morfodinâmicos. Incorporar geometria com vãos compatíveis, verificação contra impacto e gestão do corredor ripário. Avaliar o risco de falha em cascata associado à baixa altura livre e ao pequeno espaçamento entre apoios.	FHWA (2012, 2024); HEC-20 (Lagasse <i>et al.</i> , 2012); AASHTO (2020); Bradley, Richards & Bahner (2005); Palermo, Pagliara & Roy (2021); Majtan, Cunningham & Rogers (2021); Erpicum <i>et al.</i> (2024).	Avaliar disponibilidade de material mobilizável, altura livre e espaçamento entre apoios. Prever transparência hidráulica, manutenção programada e dispositivos de retenção a montante.
Altura livre	Definir a altura livre integrada ao greide de aproximação, à importância da via e ao risco aceitável; não tratá-la como critério geométrico fixo. Considerar remanso, obstrução parcial por detritos, submersão da superestrutura, cenários de adaptação climática e as incertezas hidrológicas na estimativa.	USACE EM 1110-2-1601 (USACE, 1991); Zevenbergen <i>et al.</i> (2012); AASHTO (2020).	Verificar regime livre/pressurizado e perda de folga por remanso/obstrução. Integrar tabuleiro, greide e acessos para garantir a funcionalidade da travessia.

Tabela 8 • Diretrizes técnicas, referências internacionais e aplicações práticas para projeto, avaliação e gestão resiliente de pontes frente a eventos hidrológicos extremos: procedimentos de inspeção e manutenção preventiva

Item	Orientação técnica	Referências internacionais	Aplicação prática
Inspeção preventiva	Inspeções estruturadas baseadas em risco; priorizar pontes em contextos instáveis ou de maior solicitação. Frequência ajustada à intensificação climática, ao histórico de extremos e à vulnerabilidade geomorfológica; protocolos pós-extremos. Apoiar-se em drones, sensoriamento remoto, IA, sensores de monitoramento em tempo real de erosão/socavação e câmeras para avaliação da acumulação de detritos em estruturas críticas.	Arneson <i>et al.</i> (2012); Lagasse <i>et al.</i> (2012); Cerema (2019); Devendiran, Banerjee & Mondal (2020); Abdallah, Atadero & Ozbek (2022); Ryan <i>et al.</i> (2022); Giordano, Turksezer & Limongelli (2023); Bergmeister <i>et al.</i> (2024); Peggion (2024).	Checklists para erosão, fundações expostas, proteções e alterações do canal. Priorizar pontes com baixa altura livre, histórico de submersão ou erosão, especialmente estruturas rodoviárias críticas, como pontes em rodovias de alto tráfego. Organizações municipais e estaduais devem dispor de orçamento, recursos técnicos e equipes capacitadas para atuar de forma célere quando sensores, câmeras ou inspeções indicarem situação desfavorável.

As recomendações reforçam a necessidade de avançar de uma abordagem predominantemente prescritiva, baseada em períodos de retorno, velocidades médias e margens fixas, para uma lógica orientada por desempenho e risco. Isso implica considerar, de forma integrada, adaptação climática, mudanças no uso do solo, calibração hidrológica, modelagem hidráulica representativa, velocidades locais, erosão, detritos, altura livre e inspeção preventiva. Dessa forma, as Tabelas 6 a 8 traduzem as evidências pós-evento em diretrizes técnicas para subsidiar revisões normativas, projetos de reconstrução e programas de manutenção preventiva.

6. Conclusões

Este estudo avaliou a aderência entre critérios normativos brasileiros e o desempenho hidráulico-estrutural observado em 13 pontes danificadas pelo evento extremo de 2024 na região central do Rio Grande do Sul. A análise integrou evidências de campo, modelagem hidrológica e hidráulica, caracterização das bacias e comparação com diretrizes da ABNT, DNIT, DAER-RS e Nota Técnica IPH-UFRGS.

Os resultados indicam que o desempenho observado esteve associado à interação entre fatores hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos, estruturais e territoriais, não podendo ser explicado apenas pela superação da vazão de projeto. Embora a análise pós-evento não permita atribuir cada falha exclusivamente à inadequação normativa, especialmente diante de fatores não plenamente documentados (como idade, estado de conservação, histórico de manutenção, conformidade construtiva, tipo de fundação e intervenções anteriores), foram evidenciados mecanismos hidráulico-estruturais relevantes que ainda são tratados de forma limitada nos critérios normativos, como velocidades máximas locais, desuniformidade do escoamento, processos erosivos, acúmulo de detritos, submersão da superestrutura e altura livre.

A ênfase normativa na vazão de pico não reflete integralmente a severidade de eventos prolongados. Nessas situações, volume escoado, duração da cheia, persistência de níveis elevados e tempo de exposição de fundações, encontros e aterros também condicionam o desempenho das estruturas. Além disso, mudanças no uso e cobertura do solo podem alterar a resposta hidrológica das bacias, indicando que o projeto de pontes deve considerar a bacia como um sistema dinâmico.

Em termos normativos, os resultados apontam para a necessidade de avançar de uma abordagem predominantemente prescritiva, baseada em períodos de retorno, velocidades médias e margens fixas, para uma lógica orientada por desempenho e risco. Isso inclui incorporar modelagem hidrológica calibrada, modelagem hidráulica mais representativa, estimativa de velocidades máximas locais, avaliação de erosão e detritos, critérios de altura livre e inspeção preventiva baseada em risco.

A inspeção preventiva e a reavaliação periódica das estruturas também se mostram essenciais para a gestão do risco hidrológico-hidráulico, sobretudo diante de alterações nas séries hidrológicas, no uso do solo ou no comportamento morfodinâmico dos cursos d'água. Pontes com baixa altura livre, histórico de submersão, evidências de erosão, fundações expostas, instabilidade de margens, obstruções recorrentes por detritos ou alterações no uso do solo a montante devem ser priorizadas em programas de monitoramento, manutenção preventiva e inspeção pós-evento. Essa estratégia permite identificar processos progressivos de vulnerabilização antes que evoluam para condições críticas de desempenho.

Embora os resultados sejam derivados de um conjunto regional de pontes, os mecanismos identificados são consistentes com desafios observados em outros contextos internacionais. Dessa forma, os achados reforçam a pertinência de aproximar as práticas brasileiras de projeto, verificação e manutenção de abordagens orientadas por desempenho e risco. Ainda que tais aprimoramentos possam elevar custos iniciais, eles tendem a reduzir a exposição a prejuízos associados a colapsos, interrupções viárias e isolamento de comunidades, constituindo medida de racionalidade técnica, operacional e preventiva.

Por fim, as lacunas identificadas devem ser interpretadas como fatores potenciais de vulnerabilidade, e não como causas únicas dos danos observados. Ainda assim, os resultados oferecem subsídios para aprimorar normas, projetos de reconstrução e programas de manutenção de pontes expostas a cheias extremas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo apoio institucional. Este trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Proc. 310457/25-4, 310073/25-1, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES/PROEX (Cód. 001) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

Declaração de contribuição de autoria CRediT

Yamila Soledad Chicherit: Conceituação, Investigação, Metodologia, Redação – Manuscrito Original. *Daniel Gustavo Allasia Picilli*: Conceituação, Metodologia, Redação – Revisão e Edição. *Jose G. Vasconcelos*: Análise Formal, Redação – Revisão e Edição. *André Lübeck*: Recursos, Validação, Revisão e Edição. *Rutinéia Tassi*: Supervisão, Validação. *Magnos Baroni*: Recursos. *João Francisco Horn*: Recursos. *Laisa Cancian*: Investigação.

Uso de tecnologia assistida por inteligência artificial

Os autores informam que foi utilizada ferramenta de inteligência artificial exclusivamente como apoio à redação do manuscrito, para fins de revisão linguística, tradução e/ou aprimoramento textual. Não foi utilizada para análise dos dados, interpretação dos resultados ou elaboração das conclusões. Os autores assumem total responsabilidade pelo uso de tais ferramentas, bem como por todo o conteúdo apresentado no artigo.

Declaração de conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses a ser informado.

Data availability statement

Os dados, modelos e códigos que suportam os resultados deste estudo estão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente, Yamila Soledad Chicherit.

References

- AASHTO (2020). *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdallah, A. M., R. A. Atadero, & M. E. Ozbek (2022). A state-of-the-art review of bridge inspection planning: Current situation and future needs. *Journal of Bridge Engineering* 27(2), 03121001. DOI:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001812.
- ABNT (2021). *ABNT NBR 7187: Projeto de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Araújo, D. L. (2018). *Projeto de Ponte em Concreto Armado com Duas Longarinas: Atualizado pela NBR 7188:2013* (2 ed.). Goiânia: Editora UFG.
- Arneson, L. A., L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, & P. E. Clopper (2012). HEC-18: Evaluating scour at bridges. Hydraulic Engineering Circular 18, Federal Highway Administration, Washington, D.C. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif12003.pdf> [visitado 02/09/2023].
- Asam, S., C. Bhat, B. Dix, J. Bauer, & D. Gopalakrishna (2015). Climate change adaptation guide for transportation systems management, operations, and maintenance. Report FHWA-HOP-15-026, Federal Highway Administration, Washington, D.C. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42309> [visitado 02/03/2026].
- Basso, R. E., D. G. Allasia, R. Tassi, & K. Pickbrenner (2016). Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 21(4), 635–641. DOI:10.1590/s1413-41522016133691.
- Bergmeister, K., K. T. Tsalouchidis, E. Stierschneider, L. Ilić, D. Di Luca, & N. Spiezia (2024). AI-enhanced digital inspection of bridges. *Procedia Structural Integrity* 64, 14–20. DOI:10.1016/j.prostr.2024.09.198.
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer* (2 ed.). Chichester: Wiley-Blackwell. DOI:10.1002/9781119951001.
- Boni, M. (2024). RS tem 14 pontes em rodovias estaduais e federais que precisam ser reconstruídas. GZH. URL: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2024/07/rs-tem-14-pontes-em-rodovias-estaduais-e-federais-que-precisam-ser-reconstruidas-clz2zpl1800m0013p9jjdowyh.html> [visitado 18/03/2026].
- Bonin, R. (2025). MPF abre inquérito para investigar situação crítica de pontes no Ceará. Veja. URL: <https://veja.abril.com.br/coluna/radar/mpf-abre-inquerito-para-investigar-situacao-critica-de-pontes-no-ceara/> [visitado 18/03/2026].
- Bradley, J. B., D. L. Richards, & C. D. Bahner (2005). Debris control structures: Evaluation and countermeasures. Hydraulic Engineering Circular, No. 9 FHWA-IF-04-016, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.

- Castaneda Galvis, L. F. (2023). Effect of hydrologic and hydraulic calculation approaches on pier scour estimates. Mestrado (dissertação), Auburn University, Auburn, AL. URL: <https://etd.auburn.edu/handle/10415/9073> [visitado 02/09/2026].
- Castro, C. N. (2022). *Água, Problemas Complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. DOI:10.38116/978-65-5635-031-8.
- CEMADEN (2024). *Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais*. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. URL: <https://mapainterativo.cemaden.gov.br/> [visitado 18/03/2026].
- Cerema (2019). *Analyse de risque des ponts en site affouillable*. Bron: Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. URL: <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/15753> [visitado 02/09/2026].
- Collischonn, W., R. Cabeleira, N. Ramalho, A. Ruhoff, R. Paiva, F. Fan, S. Wongchuig, & J. Breda (2024). *Chuvas sem precedentes de abril a maio de 2024 no Sul do Brasil definem novo recorde*. SciELO Preprints. DOI:10.1590/SciELOPreprints.9773.
- Costa, S. R., A. C. Nascimento, & V. S. Guimarães (2003). Proposta de adequação, ampliação e modernização da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas. In *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Curitiba, PR)*, Curitiba. ABRH.
- De Michele, C., G. Salvadori, M. Canossi, A. Petaccia, & R. Rosso (2005). Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. *Journal of Hydrologic Engineering* 10(1), 50–57. DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:1(50).
- DER-SP (2006). *Instrução de Projeto IP-DE-H00/001: Projeto de Obras de Arte Especiais*. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem.
- Devendiran, D. K., S. Banerjee, & A. Mondal (2020). Impact of climate change on multihazard performance of river-crossing bridges: Risk, resilience, and adaptation. *Journal of Bridge Engineering* 26(12), 04021068. DOI:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001797.
- Diedrich, V. L. (2011). Relação entre floresta nativa e dados geomorfológicos, no Planalto Meridional – RS. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. URL: <http://hdl.handle.net/10183/36049> [visitado 02/09/2026].
- Diário de Pernambuco (2026). Defesa civil realiza sobrevoo e vistorias em cidades do Agreste após chuvas. Diário de Pernambuco. URL: <https://www.diariodepernambuco.com.br/vida-urbana/2026/02/11708714-defesa-civil-realiza-sobrevoo-e-vistorias-em-cidades-do-agreste-apos-chuvas.html> [visitado 18/03/2026].
- DNIT (2005). *Manual de Hidrologia Básica para estruturas de drenagem (IPR-715)*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2006). *Manual de Drenagem de Rodovias (IPR-724)*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2018). *Guia de Análise de Projetos Rodoviários*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2023). *Álbum de Projetos-Tipo de Pontes Semipermanentes. Volume 1: Desenhos (IPR-751)*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT (2024). *Norma DNIT 010/2024-PRO: Inspeções em Obras de Arte Especiais*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- Epicum, S., D. Poppema, L. Burghardt, L. Benet, D. Wüthrich, E.-M. Klopries, & B. Dewals (2024). A dataset of floating debris accumulation at bridges after July 2021 flood in Germany and Belgium. *Scientific Data* 11(1), 1092. DOI:10.1038/s41597-024-03907-8.
- FHWA (2012). *Hydraulic Design of Safe Bridges*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- FHWA (2019). *Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM)*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- FHWA (2024). *FP-24 Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- Giordano, P. F., Z. I. Turksezer, & M. P. Limongelli (2023). Risk-based scour assessment of bridges: Italian vs French guidelines. In *Anais do IABMAS 2022 (Barcelona, Spain)*.
- Huizinga, R. J. (2007). Two-dimensional simulation of flow and evaluation of bridge scour at structure A-1700 on Interstate 155 over the Mississippi River near Caruthersville, MO. Scientific Investigations Report No. 2007-5230, U.S. Geological Survey. DOI:10.3133/sir20075230.
- INMET (2024). *Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMEP): Dados Meteorológicos Históricos de 2024*. Instituto Nacional de Meteorologia. URL: <https://bdmep.inmet.gov.br/> [visitado 18/03/2026].
- Jiménez, U. M., L. E. Peña, & J. López (2022). Non-stationary analysis for ROAD drainage design under land-use and climate change scenarios. *Heliyon* 8(2), e08942. DOI:10.1016/j.heliyon.2022.e08942.
- Lacko, M., K. Potocki, K. A. Škreb, & N. Bezak (2022). Joint modelling of flood hydrograph peak, volume and duration using copulas: Case study of Sava and Drava river in Croatia, Europe. *Water* 14(16), 2481. DOI:10.3390/w14162481.
- Lagasse, P. F., L. W. Zevenbergen, W. J. Spitz, & L. A. Arneson (2012). HEC-20: Stream stability at highway structures (4th ed.). Hydraulic Engineering Circular no. 20, Federal Highway Administration, Washington, D.C. URL: https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_arc.cfm?pub_number=19&id=152 [visitado 02/09/2026].
- Majtan, E., L. S. Cunningham, & B. D. Rogers (2021). Flood-induced hydrodynamic and debris impact forces on single-span masonry arch bridge. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(11), 04021043. DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001932.
- MapBiomass (2024). *Coleção de Mapas Anuais de Uso e Cobertura da Terra no Brasil*. Brasília: MapBiomass.
- Marchetti, O. (2008). *Pontes de Concreto Armado*. São Paulo: Edgard Blücher.

- Marion, F. A., E. R. Hendges, & J. Andres (2018). Compartimentos geomorfológicos no Vale do Menino Deus, Santa Maria-RS. In *Anais do Simpósio Nacional de Geografia e Gestão Territorial e Semana Acadêmica de Geografia da Universidade Estadual de Londrina (Londrina, PR)*, Londrina. UEL.
- Mendes, L. C. (2017). *Pontes* (2 ed.). Rio de Janeiro: EDUFF.
- Milly, P. C., J. Betancourt, M. Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaier, & R. J. Stouffer (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science* 319(5863), 573–574. DOI:10.1126/science.1151915.
- Nemry, F. & H. Demirel (2012). *Impacts of Climate Change on Transport: a Focus on Road and rail Transport infrastructures*. Publications Office of the European Union. DOI:10.2791/15504.
- Noskoski, L. E. C. & E. Gysi (2024). Desafios climáticos e desastres naturais no Rio Grande do Sul: urgência de ações integradas e sustentáveis. *Epitaya E-books* 1(76), 41–46. DOI:10.47879/ed.ep.2024486p41.
- Paiva, R. C. D., W. Collischonn, P. I. P. Miranda, F. Dornelles, J. Goldenfum, F. Fan, A. Ruhoff, & H. Fagundes (2024). Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na região Sul do Brasil. Nota técnica, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre. URL: <https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-criterios-hidrologicos-para-adaptacao-a-mudanca-climatica-chuvas-e-cheias-extremas-na-regiao-sul-do-brasil/> [visitado 02/09/2026].
- Palermo, M., S. Pagliara, & D. Roy (2021). Effect of debris accumulation on scour evolution at bridge pier in bank proximity. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 69(1), 108–118. DOI:10.2478/johh-2020-0041.
- Peggion, A. (2024). *La Classificazione Dei Ponti Esistenti ai Sensi Delle Linee Guida del MIT*. Doutorado (tese), ICEA, Università degli Studi di Padova. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12608/92299> [visitado 02/09/2026].
- Pfeil, W. (1979). *Pontes em Concreto Armado*. Rio de Janeiro: LTC.
- Pinos, J. & L. Timbe (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering* 12(1), 11–18. DOI:10.1016/j.wse.2019.03.001.
- Pinto, F. P. (2021). Resiliência de pontes frente a aumentos de pico de cheia: estudo de caso do Ribeirão Jacaré, em Itaitiba/SP. Mestrado (dissertação), Universidade Estadual de Campinas, Campinas. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1641330> [visitado 02/09/2026].
- Robinson, D., A. Zundel, C. Kramer, R. Nelson, W. deRosset, J. Hunt, S. Hogan, & Y. Lai (2019). 2-dimensional hydraulic modeling for highways in the river environment. Relatório técnico FHWA-HIF-19-061, Federal Highway Administration, Washington, D.C. URL: https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_arc.cfm?pub_number=213&id=173 [visitado 02/09/2026].
- Ryan, T. W., C. E. Lloyd, M. S. Pichura, D. M. Tarasovich, & S. Fitzgerald (2022). *Bridge Inspector's Reference Manual (BIRM)*. Washington, D.C.: FHWA. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/73037> [visitado 02/09/2026].
- Salvadori, G. & C. De Michele (2004). Frequency analysis via copulas: theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resources Research* 40(12). DOI:10.1029/2004WR003133.
- Santa Maria (2024). *Boletins de Defesa Civil: Eventos Hidrológicos de 2024 e 2025*. Santa Maria: Prefeitura de Santa Maria.
- Seluchi, M. (2024). Centro nacional de monitoramento e alertas de desastres naturais (apresentação, junho de 2024). Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
- SEMA (2001). *Relatório Final do Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul*, Volume 2. Porto Alegre: SEMA/UFSM.
- Sharma, S., B. S. Lee, R. E. Nicholas, & K. Keller (2021). A safety factor approach to designing urban infrastructure for dynamic conditions. *Earth's Future* 9(12), e2021EF002118. DOI:10.1029/2021EF002118.
- Silva, R. P. S. N. (2008). Estudo da erosão de pilares de pontes. Mestrado (dissertação), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. DOI:10.34626/rq48-v327.
- Silveira, J. (2025). Chuva em Santa Maria provoca alagamentos e mais de 170 pessoas já deixaram suas casas. Diário de Santa Maria. URL: https://diariosm.com.br/noticias/geral/_chuva_em_santa_maria_provoca_alagamentos_e_mais_de_170_familias_ja_deixaram_suas_casas.15430447 [visitado 18/03/2026].
- Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz, & D. Gutknecht (2005). Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research* 41(6). DOI:10.1029/2004WR003439.
- SPGG (2024). Hipsometria e unidades geomorfológicas. In G. e. G. Secretaria de Planejamento (Ed.), *Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul*. URL: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/hipsometria-e-unidades-geomorfologicas> [visitado 18/03/2026].
- Steinritz, V., P. Bellanova, B. Schmidt, H. Schütttrumpf, J. Schwarzbauer, & K. Reicherter (2024). Geomorphic changes after the 2021 central European flood in the Ahr valley by LiDAR-based differences. *Environmental Sciences Europe* 36(1), 75. DOI:10.1186/s12302-024-00893-x.
- Tassi, R., D. G. Allasia, Y. Chicherit, V. Martin, E. S. Bublitz, & V. D. Osorio (2026). *Curvas IDF Atualizadas Para Localidades da Campanha e Região Central do Rio Grande do Sul Após o Evento Extremo de 2024*. Santa Maria: UFSM. DOI:10.5281/zenodo.16879030.
- Tonin, A. L. & R. C. D. Paiva (2022). Flooding and drying simulation on floodplains using a 2d HEC-RAS model: a Sinos river case study. *RBRH* 27, e16. DOI:10.1590/2318-0331.272220220030.
- Trueheart, M. E., M. M. Dewoolkar, D. M. Rizzo, D. Huston, & A. Bomblies (2020). Simulating hydraulic interdependence between bridges along a river corridor under transient flood conditions. *The Science of the Total Environment* 699, 134046. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134046.

- USACE (1991). *EM 1110-2-1601: Hydraulic Design of Flood Control Channels*. Washington, DC: United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- USACE (2024a). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System: User's Manual. Version 4.12, CPD-74A*. Davis, CA: United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- USACE (2024b). *HEC-RAS River Analysis System: User's Manual. Version 6.6, CPD-68*. Davis, CA: United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Vangelis, H., I. Zotou, I. M. Kourtis, V. Bellos, & V. A. Tsihrintzis (2022). Relationship of rainfall and flood return periods through hydrologic and hydraulic modeling. *Water* 14(22), 3618. DOI:10.3390/w14223618.
- Viglione, A., R. Merz, & G. Blöschl (2009). On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6, 627–65. URL: <https://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/6/627/2009/> [visitado 18/03/2026].
- Wardhana, K. & F. C. Hadipriono (2003). Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 17(3), 144–150. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:3(144).
- Yang, Y., X. Xiong, B. W. Melville, & T. W. Sturm (2021). Dynamic morphology in a bridge-contracted compound channel during extreme floods: Effects of abutments, bed-forms and scour countermeasures. *Journal of Hydrology* 594, 125930. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125930.
- Zevenbergen, L. W., L. A. Arneson, J. H. Hunt, & A. Miller (2012). Hydraulic design of safe bridges. Report FHWA-HIF-12-018, Federal Highway Administration, Washington, D.C. URL: https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_arc.cfm?pub_number=1&id=153 [visitado 02/09/2026].