

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

Abordagem para avaliação de vulnerabilidades a riscos climáticos da infraestrutura rodoviária

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Helena Strieder^{1,2}; Eduardo Luis Isatto¹ & Washington Peres Núñez^{1,2}

RESUMO

Prever e mitigar os riscos decorrentes de eventos naturais é essencial para evitar acidentes, perdas humanas e danos financeiros. O desenvolvimento de uma infraestrutura resiliente às mudanças climáticas e desastres naturais é fundamental para o desenvolvimento de um mundo seguro e sustentável, alinhado com as metas propostas pela Agenda 2030 da ONU e com o Plano Global para a Década de Ação para Segurança Viária 2021-2030. Para compreender os impactos das mudanças climáticas e as opções de adaptação para os ativos rodoviários, é imprescindível analisar os riscos existentes e seus possíveis impactos. Nesse contexto, tecnologias digitais emergentes, como a Modelagem de Informação da Construção (BIM) e Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), contribuem para fornecer uma avaliação abrangente e precisa dos ativos, além de possibilitar uma previsão mais apurada dos riscos envolvidos. Diante disso, este artigo propõe uma abordagem para avaliar as vulnerabilidades da infraestrutura rodoviária em relação a eventos climáticos extremos. Essa abordagem visa fornecer subsídios para tomadas de decisão eficientes, confiáveis e proativas ou reativas diante de ocorrências de perigos. Com isso, busca-se promover a segurança e a proteção dos sistemas de transporte, permitindo uma resposta adequada aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e desastres naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Alterações climáticas; Resiliência climática; Gestão de riscos; Sistemas de Informação Geográfica (SIG); Modelagem de Informação da Construção.

ABSTRACT

Predicting and mitigating risks from natural disasters is essential to prevent accidents, human casualties, and financial losses. The development of infrastructure resilient to climate change and natural disasters is crucial for the establishment of a safe and sustainable world, aligned with the goals proposed by the UN's Agenda 2030 and the Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2021-2030. To comprehend the impacts of climate change and the adaptation options for transportation assets, it is indispensable to analyze the existing risks and their potential consequences. In this context, emerging digital technologies such as Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information Systems (GIS) contribute to providing a comprehensive and accurate assessment of assets, as well as enabling a more precise prediction of the associated risks. Therefore, this article proposes an approach to evaluate the vulnerabilities of road infrastructure in relation to climate risks. This approach aims to provide insights for efficient, reliable, and proactive or reactive decision-making in the face of hazardous occurrences. The objective is to promote the safety and protection of transportation systems, enabling an adequate response to the challenges posed by climate change and natural disasters.

KEY WORDS: Climate change; Climate response; Risk assessment; Geographic Information Systems (GIS); Building Information Modelling (BIM).

¹ Universidade Federal do Rio Grande do sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI-UFRGS), ² Laboratório de Pavimentação (LPAV-UFRGS). helena.strieder@ufrgs.br; isatto@ufrgs.br; washington.nunez@ufrgs.br.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



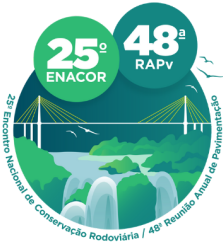
INTRODUÇÃO

Conservação viária é um conjunto de pequenas intervenções de baixo custo conduzidas de forma rotineira ou programada, com o objetivo de assegurar a vida de serviço das estruturas, desempenhando papel fundamental na segurança das rodovias. A segurança viária está relacionada a proporcionar o tráfego seguro aos usuários, e ainda, à garantia da integridade do sistema viário. A falta de manutenção ou de ações tardias levam a maiores danos na infraestrutura, comprometendo a segurança e aumentando os custos financeiros atrelados a intervenções de médio ou grande porte. Dados relacionam os problemas da infraestrutura viária, como de geometria, de sinalização e de estado do pavimento, são apontados como causas determinantes na ocorrência de mortes e acidentes registrados nas rodovias federais (CNT, 2018).

Eventos climáticos extremos impõem um novo desafio à gestão das redes de infraestrutura. Dados recentes apontaram que 35,8% dos municípios brasileiros foram atingidos por alagamentos, 32,8% por enchentes e inundações e 17,1% por escorregamentos ou deslizamentos de encostas em 2020 (IBGE, 2021). Ocorrências como essas causam efeitos imediatos à segurança dos usuários, aumentando os riscos de acidentes de trânsito e de colapsos na infraestrutura, além do impacto na conservação das rodovias, aumentando os processos de degradação natural. Isso tem relação direta com a frequência de manutenções e aumento nos custos associados. Os impactos gerados dependem das características de vulnerabilidade da via; a exemplo, a maioria dos danos significativos na região nordeste do Brasil está relacionada a ventos e secas e, na região sul, ao excesso de chuvas (WORLD BANK, 2019). Por outro lado, o nível de agressividade é relativo a medidas de mitigação de riscos e às respostas emergenciais adotadas.

Através da manutenção proativa é possível estimar o momento ideal para a intervenção, com base em sistemas de gerenciamento e modelos de previsão. Esse método busca investigar os riscos de uma forma abrangente e interdependente entre os diversos sistemas de infraestrutura, visando reagir antecipadamente aos desafios das condições climáticas severas, reduzindo os riscos e custos decorrentes (PINTO *et al.*, 2022). Geralmente, técnicas de manutenção tradicionais são baseadas em inspeções visuais, monitoramentos e análises convencionais, não fornecendo uma abordagem integrada para a tomada de decisões rápidas (ARGYROUDIS *et al.*, 2022). O desenvolvimento de estratégias de mitigação de riscos pré-evento e a identificação de possíveis vulnerabilidades de infraestrutura antes que os perigos ocorram é de suma importância para minimizar as consequências adversas (YANG *et al.*, 2021). Com tecnologias digitais emergentes e o advento da Indústria 4.0, os recursos podem ser utilizados para avaliações automatizadas, rápidas e precisas, agindo a favor da resiliência climática dos sistemas de infraestrutura. Estudos recentes demonstraram a potencialidade de sincronizar algumas ferramentas disponíveis, como o BIM, na avaliação interdisciplinar de vulnerabilidade de infraestrutura (YANG *et al.*, 2021; ARGYROUDIS *et al.*, 2020).

Atualmente há um desenvolvimento acelerado de *softwares* e normatizações para inserção das obras de infraestrutura em sistemas integrados, fortalecendo a digitalização do setor (BUILDINGSMART, 2022^a; MDIC, 2018). Recentemente foi lançada a versão 4.3 do formato neutro IFC, com a incorporação de diversos elementos de infraestrutura, como estradas, ferrovias, portos, hidrovias e pontes. Esse formato padrão neutro e estável para os modelos BIM — conhecido como OpenBIM — é mantido pelo consórcio buildingSMART Alliance e formalizado através de normas ISO, facilitando a comunicação e troca de informações entre profissionais de diversas disciplinas, independente do *software* autoral utilizado (BUILDINGSMART, 2022^b). Isso é especialmente importante considerando o potencial de uso do BIM para desempenhar o papel de um gêmeo digital, ou seja, a representação virtual do ativo ao longo de todo seu ciclo de vida, evitando



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



incompatibilidades e a perda de informações por descontinuidade de *softwares* (TCHANA; DUCELLIER; REMY, 2019).

A possibilidade de modelar em um formato neutro, com atributos específicos de infraestrutura e um sistema georreferenciado, facilita a identificação de conflitos entre diferentes projetos e de restrições ambientais. Apesar dos esforços para implementação da tecnologia em projetos de infraestrutura, os esforços para utilização de BIM envolvendo os ativos de infraestrutura existentes ainda estão bem aquém daqueles orientados à execução de novas obras. Há exemplos isolados do seu uso para a documentação da execução de obras e de projetos *as built*, integrando o BIM com tecnologias de captura, como varredura a laser e aerofotogrametria (CHONG *et al.*, 2016; MATSUMURA *et al.*, 2016). Atualmente, os esforços nacionais para a inovação digitalização do setor, como a Estratégia BIM BR, estão direcionados principalmente para projetos de novas obras, mas não existe igual atenção para a documentação da malha existente.

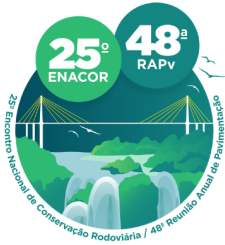
O uso da metodologia BIM para a documentação dos ativos existentes tem um enorme potencial de atuar como mediador entre diversas tecnologias e o ativo fixo, como um gêmeo digital capaz de registrar o estado atual, e ser utilizado para fins preditivos e de simulação. À medida que são analisados sistemas de infraestrutura de forma interdependente, é possível estimar, por exemplo, os efeitos de como a interrupção de um sistema de infraestrutura se propagaria para outros sistemas. Yang *et al.* (2021), por exemplo, fizeram uma simulação do fluxo rodoviário em uma situação de inundação, onde o BIM serviu para registrar informações relevantes relacionadas a documentação do ciclo de vida, enquanto o GIS foi utilizado para o registro de ativos de infraestrutura em rede e análise geoespacial, demonstrando a viabilidade da abordagem.

Nesse contexto, o artigo tem como objetivo desenvolver uma abordagem utilizando ferramentas computacionais para identificar infraestruturas rodoviárias vulneráveis a riscos decorrentes de efeitos climáticos extremos. Além de prever as consequências desses riscos, a abordagem também busca classificar e priorizar quanto a sua severidade. O propósito é orientar a tomada de decisões eficientes e proativas na manutenção de sistemas de infraestrutura suscetíveis a falhas, propondo soluções que visem prolongar a vida útil dos ativos rodoviários e prevenir acidentes, mortes e as distorções socioeconômicas decorrentes de sinistros.

ANÁLISE DE RISCOS CLIMÁTICOS

As mudanças climáticas são uma preocupação cada vez mais crescente em escala global. O relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas demonstra que o aumento de apenas 1,1 °C na temperatura já está causando impactos significativos no planeta. O aquecimento do clima tem efeito direto em diversos eventos extremos. Um aumento na temperatura resulta em uma maior probabilidade de dias e noites extremamente quentes, bem como no aumento da retenção de vapor d'água na atmosfera, aumentando a ocorrência de eventos de precipitação intensa. O nível global médio do mar aumentou mais rapidamente no século 20 do que em qualquer século anterior, sendo observado um aumento médio de 3,7 mm/ano no período de 2006-2018 (IPCC, 2021). De acordo com o IPCC (2021) esse cenário ainda vai se agravar, devido a fatores induzidos pelo homem, como o aumento das emissões e da degradação ambiental, induzindo as alterações climáticas.

O Brasil, devido à sua extensão territorial e topografia diversificada, é suscetível a uma variedade de riscos naturais e enfrentará mudanças rápidas nas condições climáticas, aumentando os riscos existentes de desastres. Estima-se que até o final deste século a temperatura média no Brasil aumente entre 1,7 °C e 5,3 °C (WORLD BANK, 2021), com projeções de aumento na precipitação anual em algumas regiões e reduções em outras (ALMAGRO *et al.*, 2017). Ao passo que sua localização em regiões tropicais representa altas temperaturas e alto potencial de evaporação,



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



resultando em grandes volumes de chuvas (WORLD BANK, 2023), de acordo com uma avaliação feita pelo Banco Mundial a seca é o risco climático mais caro do país. Enchentes e inundações estão em segundo e terceiro lugar: entre 2000 e 2018, o Brasil foi atingido por 65 enchentes, representando cerca de 71% dos desastres registrados e 88% das mortes devido a desastres no Brasil (EM-DAT, 2021).

A avaliação dos maiores riscos atuais no Brasil, como deslizamentos de terra, incêndios, secas e enchentes, revelou uma exposição alta, mas geograficamente diversa, dos principais ativos (CCDR, 2022). Enquanto o excesso de chuvas causa o maior número de desastres na região Norte, historicamente os deslizamentos de terra ocorrem nas regiões Sudeste e Sul. Os danos mais significativos à infraestrutura decorrentes de riscos naturais são encontrados no Sudeste, e as inundações impactam a maioria dos principais municípios, bem como a Amazônia ocidental e central. Além disso, calor extremo e seca têm sido fatores importantes de danos, principalmente nas regiões mais quentes do país, localizadas ao norte e no litoral nordestino (MCTI, 2020), e nas áreas urbanas, devido ao efeito de ilha de calor (WORLD BANK, 2023).

Os impactos negativos das mudanças climáticas na infraestrutura são amplamente identificados na literatura (FHWA, 2010; KANDALAI; JOHN; PATEL, 2023). O aumento da temperatura global e da retenção de calor, intensificado pelo aumento de gases de efeito estufa, está diretamente relacionado ao aumento de precipitações e elevação do nível do mar. Essas variáveis meteorológicas têm resultado direto em diversos efeitos climáticos, como inundações, chuvas e secas, causando diversos impactos na infraestrutura (FHWA, 2010; KANDALAI; JOHN; PATEL, 2023). Entretanto, as interrupções causadas por riscos naturais e mudanças climáticas variam de acordo com a localização, o risco e o tipo de infraestrutura. Por exemplo, incêndios podem limitar as operações em todos os tipos de ativos de transporte e o aumento na frequência e intensidade de eventos de chuvas intensas, como enchentes repentinas e deslizamentos de terra, afetam especialmente a rede viária, danificando os ativos interconectados (USAID, 2018). Na Figura 1, são apresentados alguns dos perigos geológicos associados às mudanças climáticas.

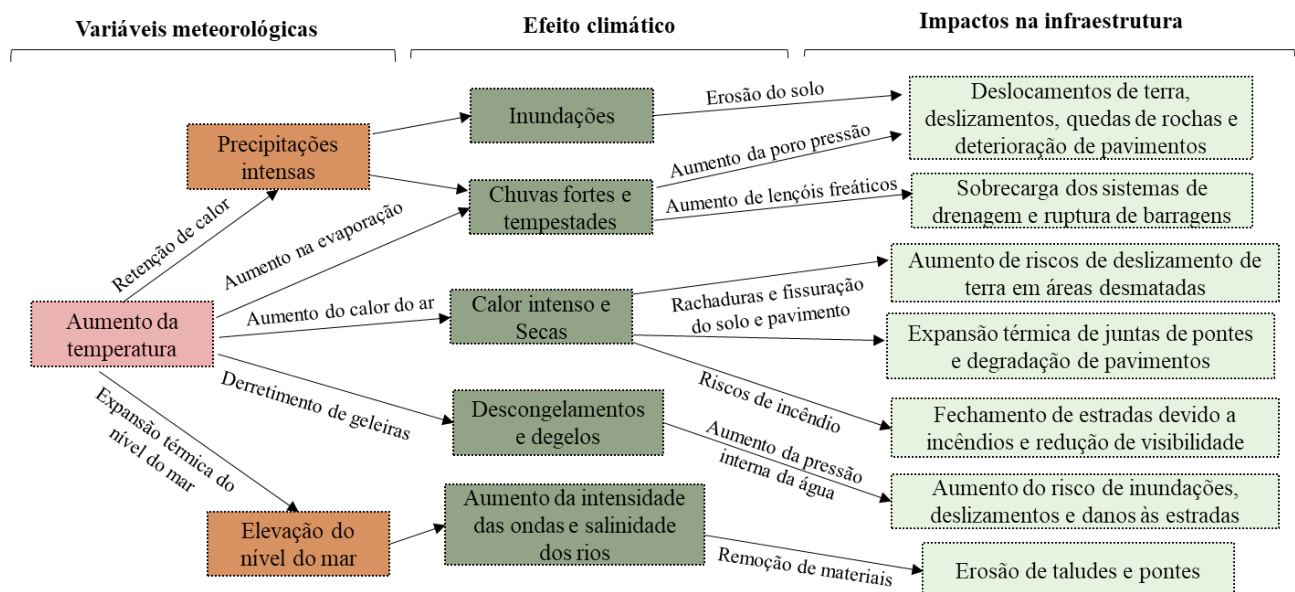
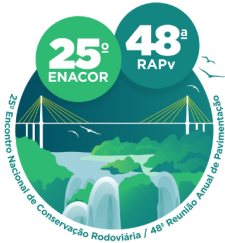


Figura 1. Impactos na infraestrutura devido a efeitos climáticos (de adaptado FHWA, 2010 e KANDALAI; JOHN; PATEL, 2023).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Ou seja, cada efeito climático acarreta um impacto específico na infraestrutura, sendo necessária a identificação dos requisitos - tanto em relação aos ativos existentes, quanto aspectos naturais - para estimar os efeitos decorrentes em cada local em análise. As zonas de intersecção desses critérios representam as áreas mais suscetíveis a desastres climáticos, e cada critério pode ser classificado de acordo com o seu nível de impacto, o que contribui para o cálculo estatístico das áreas mais críticas. Além disso, ao considerar as previsões e projeções relacionadas aos fenômenos climáticos, é possível priorizar os riscos de forma mais eficaz. Nesse contexto, os SIGs permitem a integração de dados geográficos e informações climáticas, possibilitando uma análise abrangente e espacialmente precisa das áreas de vulnerabilidade climática. Com a ajuda de ferramentas avançadas de geoprocessamento e modelagem, é possível identificar padrões, tendências e relações espaciais entre diferentes variáveis climáticas e os elementos da infraestrutura.

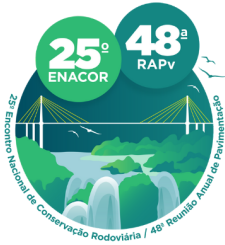
GESTÃO DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS

As respostas às mudanças climáticas são categorizadas em dois grandes grupos de ação: mitigação, que inclui medidas para reduzir a contribuição humana para a mudança climática, como por exemplo, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa; e adaptação, que envolve ações para se ajustar às novas condições climáticas, tomando medidas apropriadas (IPCC, 2022; IPCC, 2014). Diversos guias de planejamento de adaptação e avaliação de risco surgiram nos últimos anos; Stafford-Smith *et al.* (2022) analisaram 39 guias e, de acordo com os autores, a maioria das metodologias se baseia em seis etapas principais: definir o escopo, criar cenários, identificar riscos e oportunidades, priorizar opções, definir ações para implementar e monitorar, compartilhar, aprender e ajustar o curso conforme necessário.

Ou seja, o primeiro passo indicado é a definição dos objetivos e abrangência da avaliação. Nessa etapa, deve ser coletado um acervo de informações locais, como características topográficas, sociais e climáticas, através da realização de levantamentos ou bases de dados georreferenciadas. Não é necessário levantar todas as informações detalhadas, apenas as informações adequadas ao escopo da análise (YANG, 2021). A metodologia BIM auxilia muito nessa etapa para a interoperabilidade da informação entre as diversas disciplinas e partes interessadas. É possível inserir arquivos de nuvem de pontos, coletada utilizando drone ou *laser scanner*, que facilita na modelagem e estudos de impacto de estruturas existentes (LIMA, 2019; JUSTO *et al.*, 2021).

Com o avanço de tecnologias de geoprocessamento, diversos bancos de dados espaciais e demográficos estão disponíveis. Soares *et al.* (2022) utilizaram diversos dados disponibilizados pelo IBGE, como mapas da adequabilidade dos serviços de água, esgoto e resíduos sólidos, em formato *shapefile*. Os conjuntos de dados relacionados ao ambiente construído podem ser originalmente representados em vários formatos, como *CityGML*, *Esri Shapefile*, *CSV*, *GDF*, *DXF*, *GeoJSON*, entre outros. Dependendo do formato suportado pela plataforma GIS selecionada, ferramentas auxiliares, como o FME, podem ser utilizadas para traduzir e converter os conjuntos de dados originais para o formato de destino reconhecido pela plataforma GIS (YANG, 2020). Uma vez que esses bancos de dados são frequentemente atualizados e alimentados com novas informações, é importante, regularmente, atualizar os dados climáticos e reavaliar as análises realizadas para assegurar que as informações estejam atualizadas e precisas. Estabelecer um sistema de monitoramento contínuo das vulnerabilidades climáticas das infraestruturas críticas é crucial para garantir a resposta rápida a mudanças nas condições climáticas.

Considerando que a vulnerabilidade futura dos ativos de infraestruturas críticas é determinada pela alteração no padrão de eventos climáticos extremos, é importante avaliar o impacto das mudanças e futuras ameaças climáticas. Isso pode incluir modificações na frequência ou intensidade dos



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

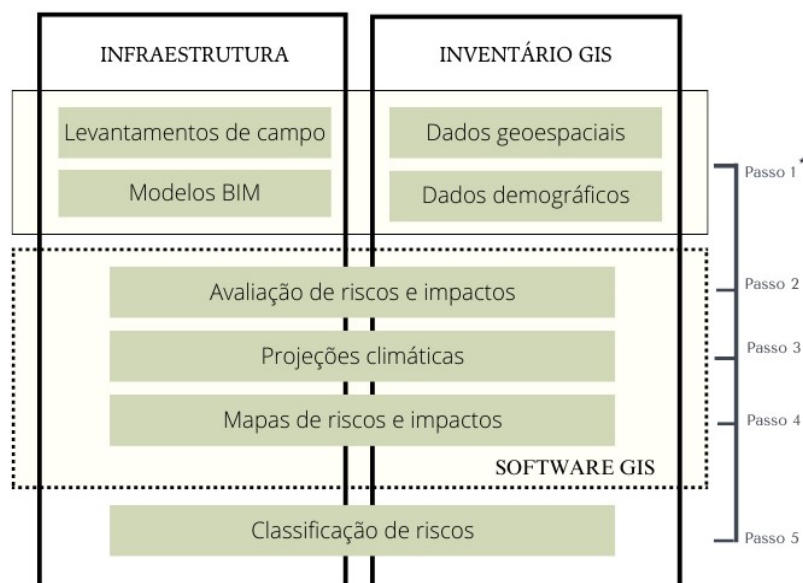


eventos, bem como o surgimento de novos riscos. A análise assistida por GIS permite simulações e análises espaciais dos possíveis impactos das mudanças climáticas em diversas escalas.

Para a identificação das áreas e infraestruturas em risco, os dados dos ativos de infraestrutura existentes são combinados com dados de vulnerabilidades climáticas – tanto atuais quanto projeções. Ferramentas GIS permitem integrar todas as informações de diversas fontes para identificar zonas críticas. Nesta fase, uma matriz de informações pode ser desenvolvida para destacar as principais relações entre as ameaças climáticas e os sistemas de infraestrutura. Identificar e localizar ativos de infraestrutura em áreas de ameaças climáticas e quantificar os ativos vulneráveis atuais e futuros são etapas essenciais nesse processo.

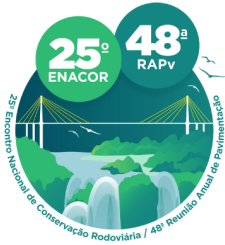
Ainda, é possível gerar escalas de risco para priorizar as ações de mitigação ou preparação, visando reduzir as vulnerabilidades climáticas identificadas. Considerar custos, benefícios e viabilidade técnica é fundamental para definir as prioridades. Para a definição da ponderação dos indicadores, é importante contar com a participação de especialistas, consulta à literatura e troca de informações com as partes interessadas para garantir sua precisão e rigor (MINFRA, 2022). Diferentes formas de análise de risco climático e ponderação dos indicadores são encontradas na literatura. Soares *et al.* (2022), por exemplo, avaliaram a fragilidade relacionada à oferta de saneamento básico na cidade de Gravataí-RS, utilizando o método de análise multicritério, que atribui pesos e pondera entre o melhor e pior cenários; nesse caso, os critérios utilizados foram as diferentes formas de oferta de água, esgoto e coleta de resíduos sólidos. A Metodologia do IPCC (2014) calcula o risco climático como uma função da ameaça, exposição e vulnerabilidade. Vários critérios podem ser usados para avaliar a importância dos ativos, como por exemplo a sua relevância para a sociedade e o número de pessoas atendidas. HAWCHAR *et al.* (2020) classificaram o nível de importância da rodovia de acordo com o tipo de via: local, regional, nacional e internacional.

Nesse contexto, foi proposta uma estrutura de metodologia para análise de riscos infraestruturas sujeitas a eventos climáticos extremos. A abordagem consiste em uma metodologia de cinco passos: Definição de escopo; Organização do inventário de dados; Projeções de mudanças climáticas; Avaliação de riscos e impactos e Classificação de riscos e priorização. A Figura 2 apresenta o fluxograma da abordagem.



* Adequado ao escopo e dados disponíveis

Figura 2. Fluxograma para análise de vulnerabilidade climática.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



A estrutura consiste em cinco passos, que requerem dados de entrada sobre infraestrutura crítica e o local em análise. A partir dos dados inventariados, deve ser estabelecida a relação entre os ativos e as ameaças climáticas para identificar quais trechos são vulneráveis a quais ameaças climáticas. Também devem ser feitas projeções para examinar o impacto das mudanças climáticas, como o aumento da quantidade de chuvas na região, fornecendo uma indicação do local impactado. Os resultados da abordagem são mapas informativos, que classificam os riscos e dão subsídios para a priorização de ações. Essa é uma estrutura básica que pode ser adaptada de acordo com as necessidades específicas do estudo e disponibilidade de dados.

APLICAÇÃO DA ABORDAGEM

Buscando verificar a aplicabilidade do fluxograma proposto, foi avaliado o efeito do aumento do nível do mar quanto à inundação das rodovias do estado de Santa Catarina, região com histórico de catástrofes ambientais. A Figura 3 resume o passo a passo adaptado para o escopo em estudo e na sequência são detalhadas todas as etapas.

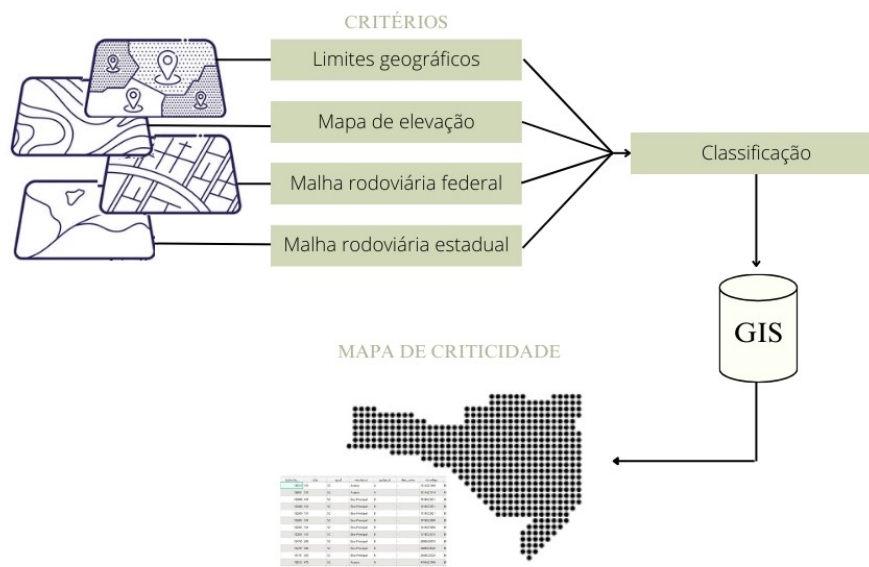


Figura 3. Fluxograma da aplicação da metodologia de análise de vulnerabilidade climática.

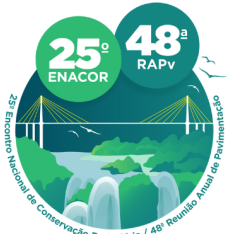
Passo 1. Definição de escopo

Nessa etapa, considerando a região em estudo, foram avaliados os riscos de fenômenos extremos que a área está sujeita. Essa é uma região costeira, portanto suscetível ao efeito do aumento do nível do oceano. Portanto, buscou-se avaliar o efeito de inundações (fenômeno) provocada pela elevação do nível mar (risco climático). Para tanto, definiram-se como requisitos de análises os limites geográficos, mapas de elevação e malha rodoviária.

Risco climático avaliado	Efeito na infraestrutura	Critérios
- Aumento do nível do mar	- Alagamento de rodovias e interrupção de tráfego	- Mapa geográfico - Mapa de elevação - Malha rodoviária

Passo 2. Organização do inventário de dados

Dados de fontes nacionais foram coletadas para o estudo. Os dados de limites geográficos foram retirados do site do IBGE. Mapa de elevação foi gerados através do complemento SRTM-



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Downloader que conecta ao site *Eartdata*. Malha rodoviária federal do site do DNIT e malha rodoviária estadual do site da Secretaria de Infraestrutura do Estado (SIE-SC). Todos os dados estavam em formato *shapefile*, portanto puderam ser inseridos diretamente no *software* GIS.

Passo 3. Projeções de mudanças climáticas

Para avaliar os potenciais efeitos climáticos, foi realizada a projeção de aumento do nível do mar de 1 metro e 5 metros, utilizando a plataforma do QGIS. Os resultados das simulações são apresentados na Figura 4, evidenciando os impactos esperados.

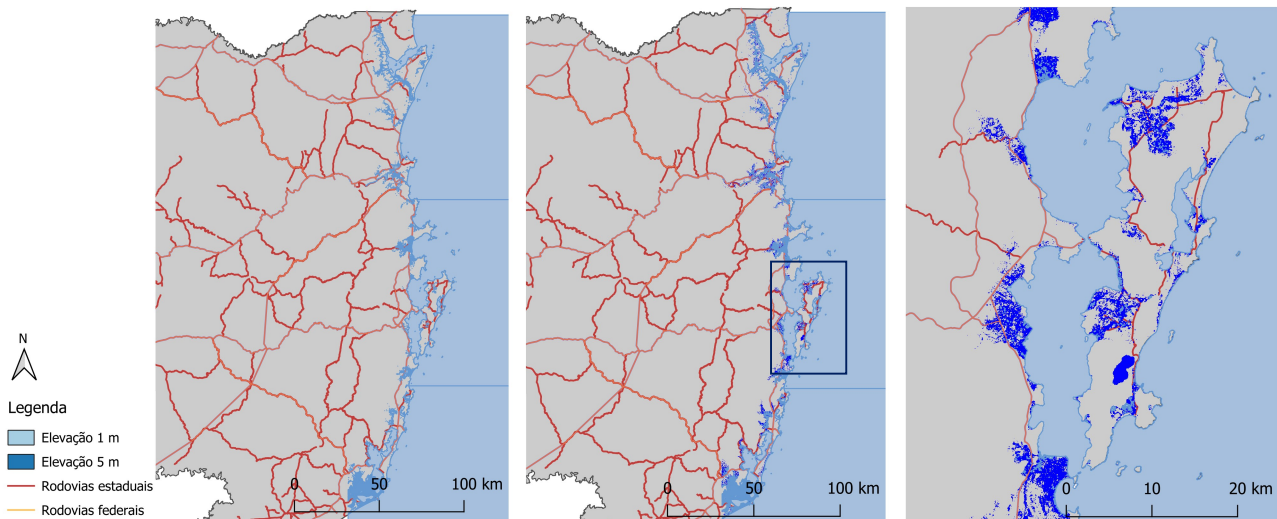


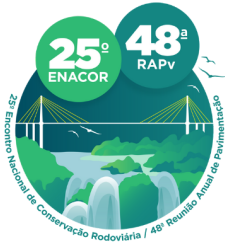
Figura 4. Mapa de risco: simulação da elevação do nível do mar em 1m (a), para 1 e 5 m (b) e aproximação para identificar intersecção entre rodovias e áreas alagadas na região de Florianópolis (c).

Passo 4. Avaliação de riscos e impactos

A avaliação de riscos da exposição das rodovias a esses eventos extremos. Para a intersecção entre malha rodoviária e exposição utilizou-se a ferramenta “calculadora raster”. A Figura 5 apresenta um exemplo de tabela de atributos que podem ser extraídas diretamente da plataforma GIS.

	d_trecho_vl_br	g_u	nm_tipo_tr	vl_codigo	ds_locali	vl_km_inic	vl_km_fina	l_extensi_s_sup_fe	ul	ds_coinc	ds_tipo_ad	ds_jurisd	ds_supe		
1	158515	101	SC	Acesso	101ASC1005	ENTR BR-101 (0...	0	3,9	3,9	IMP	São José	101ASC1005	Federal	Federal	N_PAV
2	159951	101	SC	Acesso	101ASC1010	FIM OBRA IMP...	3,9	6,3	2,4	IMP	São José	101ASC1010	Federal	Federal	N_PAV
3	158511	116	SC	Acesso	116ASC1005	ENTR BR-116 (K...	0	1,3	1,3	IMP	Lages	116ASC1005	Federal	Federal	N_PAV
4	154869	285	SC	Eixo Principal	285BSC0050	ENTR CONTOR...	33,8	37,7	3,9	IMP	Tubarão	285BSC0050	Federal	Federal	N_PAV
5	162117	285	SC	Eixo Principal	285BSC0055	ENTR CONTOR...	37,7	42,6	4,9	IMP	Tubarão	285BSC0055	Federal	Federal	N_PAV
6	162116	285	SC	Eixo Principal	285BSC0060	INICIO SUBIDA ...	42,6	55,6	13	IMP	Tubarão	285BSC0060	Federal	Federal	N_PAV

Figura 5. Tabela de atributos da intersecção entre malha federal e inundação devido elevação de 1m.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Passo 5. Classificação de riscos e priorização

Nessa etapa, precisam ser definidos critérios para a priorização de ações. Vários critérios podem ser usados para avaliar a importância dos trechos rodovia, por exemplo, densidade média de tráfego diário, custo médio de reparo, tipo da rodovia. Para exemplificar, através da ferramenta “intersecção”, foram identificados pontos da malha atingidos pela inundação decorrente do aumento do nível do mar de 1m, sendo identificaram-se 39 pontos de inundação. Com base nos dados disponíveis, a priorização foi dada para as rodovias federais e eixo principal. Dessa forma, através de uma análise simplificada, são priorizados 11 locais críticos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresentou uma abordagem para a avaliação de vulnerabilidades a riscos climáticos da infraestrutura rodoviária existente. A metodologia proposta, composta por cinco passos, pode ser adaptada de acordo com as necessidades e a disponibilidade de dados específicos.

Os primeiros passos envolvem a identificação das variáveis meteorológicas e dos riscos climáticos aos quais a área de estudo está exposta, bem como a coleta de informações relevantes sobre o local e o sistema de infraestrutura. A integração de tecnologias complementares entre si, como BIM e GIS, permite uma análise abrangente e uma tomada de decisão mais eficiente.

A aplicação dessa abordagem foi demonstrada por meio da avaliação das rodovias afetadas por inundações devido à elevação do nível do mar no estado de Santa Catarina. É importante destacar que essa foi uma análise simplificada e que pode ser complementada pela consideração de outros efeitos climáticos e pela identificação dos efeitos cascata resultantes das interdependências entre os sistemas de infraestrutura.

Recomenda-se a implementação gradual dessa metodologia, aumentando progressivamente a área de abrangência das análises e fortalecendo a inter-relação entre os sistemas de infraestrutura. Um estágio avançado desse processo seria a criação de um gêmeo digital, no qual todas as informações do sistema de infraestrutura são registradas, apoiando atividades de operação, manutenção e intervenção.

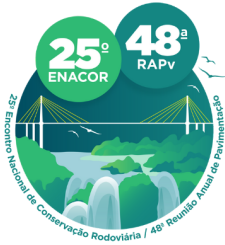
O objetivo final dessa avaliação é propor soluções que prolonguem a vida útil dos ativos rodoviários, prevenindo acidentes, mortes e minimizando as distorções socioeconômicas resultantes. Ao adotar essa abordagem, é possível criar um ambiente resiliente e seguro, no qual a infraestrutura rodoviária esteja preparada para enfrentar os desafios climáticos e contribuir para o bem-estar da sociedade como um todo.

Em resumo, a abordagem proposta neste artigo oferece uma estrutura ampla e adaptável para a avaliação de vulnerabilidades a riscos climáticos da infraestrutura rodoviária, visando promover a resiliência e a segurança das vias e, conseqüentemente, melhorar a qualidade de vida da população. A implementação gradual e a integração de tecnologias inovadoras são fundamentais para alcançar esses objetivos e enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ALMAGRO, A., OLIVEIRA, P., NEARING, M., & HAGEMANN, S. Projected climate change impacts on rainfall erosivity over Brazil. *Scientific Reports*, 7, 2017.

ARGYROUDIS, S. A. *et al.* Resilience assessment framework for critical infrastructure in a multi-hazard environment: Case study on transport assets. *Science of the Total Environment*, v. 714, 2020.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



ARGYROUDIS, S. A. *et al.* Digital technologies can enhance climate resilience of critical infrastructure. *Climate Risk Management*, v. 35, 2022.

BUILDINGSMART. IFC Infrastructure Deployments. Disponível em: <<https://www.buildingsmartusa.org/standards/rooms/infrastructure/ifc-bridge/>>. Acesso em: 11 set. 2022.

BUILDINGSMART. IFC 4.3.0.1. Disponível em: <<http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>>. Acesso em: 11 set. 2022.

CHONG, H. Y. *et al.* Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects. *Journal of Management in Engineering*, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 1–13, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. CNT. Acidentes Rodoviários e a Infraestrutura. P.140,2018.

EM-DAT Atlas. Disponível em:

https://www.emdat.be/emdat_atlas/sub_html_pages/sub_html_BRA.html. Acesso em 29 mai. 2023.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Regional Climate Change Effects: Useful Information for Transportation Agencies, 2010.

HAWCHAR, Lara *et al.* A GIS-based framework for high-level climate change risk assessment of critical infrastructure. *Climate Risk Management*, v. 29, p. 100235, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Perfil dos municípios brasileiros (Munic 2020). IBGE, p. 122, 2021.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

http://epic.awi.de/37530/1/IPCC_AR5_SYR_Final.pdf.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis Contributo do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas. doi:10.1017/9781009157896.

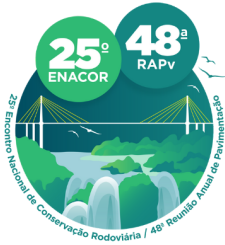
JUSTO, A.; SOILÁN, M.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A.; RIVEIRO, B. Scan-to-BIM for the infrastructure domain: Generation of IFC-complaint models of road infrastructure assets and semantics using 3D point cloud data. *Automation in Construction*, v. 127, 2021.

KANDALAI, S., JOHN, N. J., & PATEL, A. Efeitos das Mudanças Climáticas em Infraestruturas Geotécnicas — estado da arte. *Environ Sci Pollut Res*, 30, 16878–16904 (2023). DOI: 10.1007/s11356-022-24788-7.

LIMA, J. P. A. Aplicação da metodologia BIM para estudos de obras de infraestrutura de transporte: estudo de caso – projeto de pavimentação da via SC-436. Trabalho de conclusão – curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

MATSUMURA, R. *et al.* CIM Initiatives for Tokyo Gaikan Expressway Tajiri Construction Project. [s. l.], p. 1098–1105, 2016.

MCTI. Fourth National Communication of Brazil to the UNFCCC. 2020. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4a%20Comunicacao%20Nacional.pdf>. Acesso em 10 mar. 2023.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. MDIC. Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – BIM. Disponível em <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-externo/pt-br/imagens/REPOSITORIO/sdci/CGMO/26-11-2018-estrategia-BIM-BR-2.pdf>.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Resiliência climática na infraestrutura de transportes - Módulo 5: Ferramentas de Análise de Riscos Climáticos. Disponível em: <https://www.escolavirtual.gov.br/curso/784>. Acesso em 29 mai. 2023.

PINTO, P. *et al.* Proposição de uma nova metodologia para preservação do patrimônio rodoviário brasileiro: a Manutenção Proativa. In: 24º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). Anais eletrônico [...]. Bento Gonçalves, 2022, p. 1035-1046. Disponível em <https://www.rapvenacor.com.br/wp-content/uploads/2022/08/Anais-24-47-ENACOR.pdf>. Acessado em: 11 set. 2022.

SOARES *et al.* Análise Multicritério das Fragilidades Relacionadas ao Saneamento Básico: Estudo de Caso de Gravataí-RS. Disponível em: <https://www2.faccat.br/portal/sites/default/files/An%C3%A1lise%20Multicrit%C3%A9rio%20das%20Fragilidades%20Relacionadas%20ao%20Saneamento%20B%C3%A1sico%20Estudo%20de%20Caso%20de%20Gravata%C3%AD%20RS.pdf>. Acesso em 29 mai. 2023.

STAFFORD-SMITH, Mark *et al.* Climate change adaptation guidance: Clarifying three modes of planning and implementation. *Climate Risk Management*, v. 35, p. 100392, 2022.

TCHANA, Y.; DUCELLIER, G.; REMY, S. Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management. *Procedia CIRP*, v. 84, p. 545–549, 2019.

USAID. Climate Risk Profile Fact Sheet — Brazil. 2018. Disponível em: https://www.climatelinks.org/sites/default/files/asset/document/2018-April-30_USAID_CadmusCISF_Climate-Risk-Profile-Brazil.pdf. Acesso em 29 mai. 2023.

WANG, Tianni *et al.* Impact analysis of climate change on rail systems for adaptation planning: A UK case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 83, p. 102324, 2020.

WORLD BANK. Improving Climate Resilience of Federal Road Network in Brazil. *Improving Climate Resilience of Federal Road Network in Brazil*, [s. l.], n. May, 2019.

WORLD BANK. Climate Risk Country Profile: Brazil. Washington, DC: Grupo Banco Mundial. 2021. Disponível em: https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/2021-07/15915-WB_Brazil%20Country%20Profile-WEB.pdf. Acesso em 01 mai. 2023.

YANG, Y. *et al.* BIM-GIS-DCEs enabled vulnerability assessment of interdependent infrastructures – A case of stormwater drainage-building-road transport Nexus in urban flooding. *Automation in Construction*, [s. l.], v. 125, n. September 2020, p. 103626, 2021.