



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v18n12024p28-44

Submetido em: 31 ago. 2024

Aceito em: 02 nov. 2024

Análise de riscos climáticos em infraestruturas de transportes: uma exploração metodológica

Climate risk analysis in transportation infrastructure: a methodological exploration

Victor Hugo Souza de Abreu  <https://orcid.org/0000-0002-2557-2721>

Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.
Doutor em Engenharia de Transportes.

E-mail: victor@pet.coppe.ufrj.br

Rafael Ferraz dos Santos  <https://orcid.org/0009-0003-5182-9513>


Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.
Mestrando em Engenharia de Transportes.

E-mail: rafael.ferraz@pet.coppe.ufrj.br

Sandra Oda  <https://orcid.org/0000-0002-1317-4232>

Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.
Professora em Engenharia de Transportes.

E-mail: sandraoda@poli.ufrj.br

Andrea Souza Santos  <https://orcid.org/0000-0002-5984-6313>

Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.
Professora em Engenharia de Transportes.

E-mail: andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br

Resumo: A mudança climática apresenta desafios substanciais ao setor de transportes, devido à sua alta vulnerabilidade a condições climáticas adversas e eventos extremos, que impactam diretamente a longevidade das infraestruturas e a segurança operacional. Este estudo examina a necessidade imperativa de integrar considerações climáticas no planejamento e execução de projetos de infraestrutura de transporte, por meio de uma Análise de Risco Climático (ARC) abrangente e metodologicamente rigorosa. São analisadas diversas metodologias de ARC, com destaque para suas vantagens e limitações, além da importância de uma abordagem integrada que contemple resiliência, sustentabilidade e justiça climática. O estudo também discute os impactos econômicos das estratégias de adaptação e explora os desafios e oportunidades específicos para os países em desenvolvimento. A pesquisa conclui que uma abordagem holística e adaptativa é essencial para enfrentar os complexos desafios impostos pela mudança climática ao setor de transportes, promovendo não apenas a mitigação dos riscos, mas também a adaptação sustentável e inclusiva.

Palavras-chave: Mudança Climática. Infraestrutura de Transporte. Análise de Risco Climático. Estratégias de Adaptação.

Abstract: Climate change poses substantial challenges to the transportation sector due to its high vulnerability to adverse weather conditions and extreme events, which directly impact infrastructure longevity and operational safety. This study examines the critical need to integrate climate considerations into the planning and execution of transportation infrastructure projects through comprehensive and methodologically rigorous Climate Risk Analysis (CRA). Various CRA methodologies are analyzed, highlighting their advantages and limitations, as well as the importance of an integrated approach that encompasses resilience, sustainability, and climate justice. The study also discusses the economic impacts of adaptation strategies and explores the challenges and opportunities developing countries face. The research concludes that a holistic and adaptive approach is essential to addressing the complex challenges posed by climate change to the transportation sector, promoting risk mitigation and sustainable and inclusive adaptation.

Keywords: Climate Change. Transportation Infrastructure. Climate Risk Analysis. Adaptation Strategies.

1 Introdução

Os sistemas de transporte e suas infraestruturas foram majoritariamente projetados e operados para condições climáticas históricas, com alguma margem de segurança que, atualmente, é frequentemente ultrapassada devido a eventos extremos fora da faixa "típica", provocados pela mudança climática (EVANS, TSOLAKIS e NAUDÉ, 2009a; MARKOLF *et al.*, 2019a). A vida útil projetada para uma ponte pode variar de 50 a 100 anos, enquanto para uma rodovia pode variar de 20 a 30 anos, tornando-se, portanto, imperativo considerar os eventos climáticos futuros e como esses eventos afetarão os investimentos e a capacidade de manutenção da infraestrutura (GALLA, 2021a). O aumento na frequência de enchentes, ondas de calor e tempestades ameaça diretamente a longevidade e a funcionalidade dessas infraestruturas de transporte, conforme evidenciado por EVANS, TSOLAKIS e NAUDÉ (2009b) e por MARKOLF *et al.* (2019b), o que exige uma reavaliação urgente das práticas de planejamento e construção. Nesse contexto de incerteza climática e riscos elevados, torna-se crucial incorporar as mudanças climáticas como uma variável central na gestão de ativos de transporte, assegurando que a infraestrutura não apenas seja confiável sob condições normais, mas também minimize a magnitude e a duração das falhas sob condições excepcionais (QUINN *et al.*, 2018).

A mudança climática impõe diversos desafios ao setor de transporte, devido à sua alta vulnerabilidade às condições climáticas e meteorológicas (ABREU *et al.*, 2023) e aos impactos resultantes de eventos climáticos extremos, que afetam diretamente a vida útil da infraestrutura e a segurança operacional (WANG *et al.*, 2020). Isso ressalta a necessidade de integrar considerações sobre mudança climática em projetos regulares de infraestrutura de transporte, abrangendo toda a vida útil desses ativos (CHAUSSON *et al.*, 2020). Contudo, as agências de transporte enfrentam recursos financeiros limitados para a manutenção de rodovias e, simultaneamente, enfrentam pressões por infraestrutura mais sustentável (ACHEBE *et al.*, 2021). O risco climático para uma infraestrutura de transporte é determinado por uma variedade de fatores, incluindo sua natureza, localização, características de projeto e práticas de construção (EVANS, TSOLAKIS e NAUDÉ, 2009a). Essa realidade ressalta a complexidade das interações entre os

diferentes fatores de risco associados à mudança climática e como esses riscos podem se agravar ou multiplicar (SIMPSON *et al.*, 2021).

A necessidade de adaptar as infraestruturas de transporte às mudanças climáticas vai além de uma questão técnica, sendo também um imperativo socioeconômico. A falta de ação nesse sentido pode resultar em consequências significativas, como altos custos de reparo, interrupções no comércio e no transporte, e até mesmo a perda de vidas humanas. Eventos climáticos extremos podem causar danos extensivos a rodovias e pontes, resultando em longos períodos de inatividade e elevados custos de reconstrução, frequentemente superiores aos recursos financeiros disponíveis para as agências de transporte. Esses impactos não se limitam à infraestrutura física, mas também provocam repercussões econômicas mais amplas, como a interrupção das cadeias de suprimentos, o que reforça a urgência de uma abordagem proativa na adaptação (GALLA, 2021b; ACHEBE *et al.*, 2021).

Surge então a questão de como as autoridades rodoviárias devem proceder para integrar a variável climática na gestão dos ativos usuais (AUERBACH E HERRMANN, 2016; THE WORLD BANK, 2017). Dessa forma, torna-se necessário que os tomadores de decisão de transportes (incluindo, engenheiros rodoviários, gerentes de ativos, profissionais de adaptação à mudança climática, gerentes de inovação e gerentes de projeto) realizem uma aprofundada Análise de Risco Climático (ARC) (ABREU, RIBEIRO E SANTOS, 2022; ABREU, SANTOS e MONTEIRO, 2022). Segundo o IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change – IPCC, 2014), as ARC devem considerar três componentes: ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa). Esta análise deve considerar ferramentas para apoiar os tomadores de decisão usando dados observacionais e/ou experimentais e modelos de simulação de cenários para quantificar os impactos de eventos extremos e mudança climática incremental e identificar pontos quentes na rede de transportes em qualquer localização geográfica do mundo (PÉREZ-MORALES, GOMARIZ-CASTILLO e PARDO-ZARAGOZA, 2019).

Este estudo tem como objetivo examinar diversas metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, com ênfase nas vantagens mais destacadas e na identificação dos desafios significativos. O trabalho também foca na convergência dessas metodologias, oferecendo uma visão abrangente dos elementos cruciais que devem ser considerados em uma ARC.

2 Material e Método

Este estudo adota uma abordagem dividida em 4 etapas para examinar as metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, destacando vantagens proeminentes e identificando desafios significativos. A metodologia será delineada de acordo com as etapas apresentadas na Figura 1.

Figura 1. Metodologia científica.

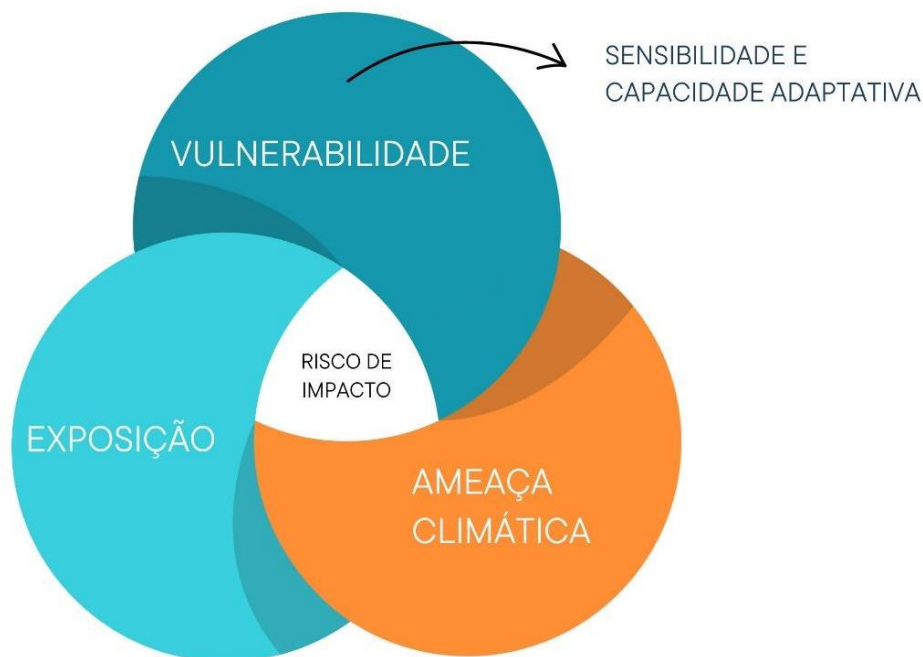


Fonte: elaborado pelos autores.

3 Análise de Risco Climático

Os riscos climáticos afetam diretamente os ativos físicos de infraestrutura e impactam de forma significativa a economia do país (ABREU *et al.*, 2022; GHADGE, WURTMANN e SEURING, 2020), logo, qualificar e quantificar os riscos relacionados ao clima proporciona maior margem de manobra para reduzir os desastres e prejuízos em âmbito nacional (ABREU *et al.*, 2023). Segundo exposto pelo IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2014), a ARC deve envolver a ameaça climática, a exposição e a vulnerabilidade (dada em função da sensibilidade e capacidade adaptativa) das infraestruturas, conforme exposto na Figura 2.

Figura 2. Modelo conceitual para análise do risco de impacto da mudança climática.



Fonte: Adaptado de IPCC (2014a).

Pela Figura 2, nota-se que o risco de impacto é o resultado emergente da interação entre suas três dimensões/componentes, que podem ser entendidas, conforme exposto pelo ADAPTABRASIL MCTI (s.d.):

- Ameaça: é o processo externo climático (tais como estiagem, precipitações intensas e ondas de calor) que interage com o ambiente de análise e que possuem capacidade de transformação significativa no sistema, seja ela lenta ou repentina;
- Exposição: é o grau, duração e/ou extensão a que o sistema está sujeito no contato com a ameaça climática, sendo uma propriedade relacional entre o ambiente de análise e a ameaça;
- Vulnerabilidade: é a suscetibilidade a danos potenciais para uma mudança ou uma transformação do ambiente de análise, quando confrontados com uma ameaça, e não como o resultado desse confronto. Além disso, é estabelecida em função da sensibilidade e da capacidade adaptativa, que podem ser descritas como:
 - Sensibilidade: é o grau em que o sistema em análise é afetado, adversamente ou benéficamente, por estímulos relacionados ao clima, de forma direta ou indireta; e
 - Capacidade adaptativa: é a habilidade do sistema de se ajustar a um distúrbio ou danos potenciais, aproveitando as oportunidades e lidando com as consequências de uma transformação que ocorra.

A ARC desempenha um papel crucial no setor de transportes, oferecendo benefícios significativos em face da mudança climática, conforme destacado na Tabela 1.

Tabela 1. Benefícios da realização de ARC no setor de transportes.

Benefício	Descrição
Resiliência da Infraestrutura	A ARC permite avaliar e fortalecer a resiliência da infraestrutura de transporte contra eventos climáticos extremos, como enchentes, tempestades e elevação do nível do mar. Isso é essencial para garantir a continuidade operacional e reduzir danos materiais.
Tomada de Decisões Informada	A compreensão dos riscos climáticos ajuda na tomada de decisões informada. Planejadores e gestores podem adotar medidas preventivas e estratégias de adaptação, minimizando os impactos adversos nos serviços de transporte.
Planejamento a Longo Prazo	A ARC permite um planejamento mais eficaz a longo prazo, considerando os cenários climáticos futuros. Isso é fundamental para garantir que as decisões de investimento e expansão da infraestrutura estejam alinhadas com as projeções climáticas.
Proteção dos Usuários	A ARC contribui para a segurança dos usuários, considerando potenciais ameaças climáticas. Isso é especialmente relevante para evitar acidentes e garantir a segurança nas rodovias, ferrovias, portos e aeroportos.
Redução de Custos de Manutenção	Ao identificar áreas propensas a desgastes acelerados devido a condições climáticas adversas, a ARC possibilita estratégias proativas de manutenção, reduzindo custos operacionais a longo prazo.
Atendimento a Requisitos Regulatórios	Com o aumento da conscientização ambiental e das regulamentações relacionadas à mudança climática, a ARC auxilia o setor de transportes a cumprir requisitos legais e normativos, promovendo práticas mais sustentáveis.

Fonte: Baseado em Abreu (2023).

Conforme evidenciado na Tabela 1, a incorporação da ARC não apenas fortalece a resiliência do setor de transportes, mas também emerge como um componente essencial para impulsionar a eficiência operacional e mitigar desafios prementes. Ao promover práticas sustentáveis, a ARC desempenha um papel crucial na redução da pegada ambiental, alinhando-se de forma inovadora com os objetivos globais de sustentabilidade. Essa abordagem atende às demandas contemporâneas do setor, proporcionando uma base sólida para a segurança contínua dos sistemas de transporte e fomentando um ecossistema resiliente e eficaz.

4 Metodologias de Análise de Risco Climático referentes ao setor de transportes

Uma análise abrangente das metodologias de ARC implementadas globalmente no setor de transportes serve para destacar tanto seus aspectos positivos quanto às limitações a serem superadas e assim alcançar uma ARC mais alinhada com a realidade (ABREU, RIBEIRO e SANTOS, 2021a; ABREU, RIBEIRO e SANTOS, 2021b). Nesse contexto, a Tabela 2 oferece um resumo das principais metodologias desenvolvidas para a adaptação, concentrando-se explicitamente na infraestrutura de transporte.

Nesse contexto, torna-se imperativo adotar uma abordagem antecipatória na gestão das consequências da mudança do clima. Isso implica não apenas a avaliação dos riscos imediatos, mas também

uma análise aprofundada das tendências futuras e dos possíveis cenários de impacto. Dessa forma, as estratégias de adaptação podem ser desenvolvidas de maneira mais eficaz e abrangente, assegurando a resiliência das infraestruturas e dos sistemas organizacionais frente aos desafios climáticos em constante evolução.

Tabela 2. Metodologias de Análise de Risco Climático para o setor de transportes - mundo.

Estrutura	País de Origem	Descrição
<p><i>Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework</i> (U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - U.S. DOT, 2015).</p>	Estados Unidos	<p>Enquanto a maioria das estruturas de planejamento de adaptação concentra-se na infraestrutura em nível de sistema, a estrutura conceitual do <i>Federal Highway Administration</i> (FHWA) concentra-se na infraestrutura em nível de ativo ou projeto. Seu objetivo é identificar as principais considerações, perguntas e recursos que podem ser usados para projetar e implementar uma avaliação da vulnerabilidade à mudança climática. Ele dá uma visão geral das principais etapas na condução de avaliações de vulnerabilidade e usa exemplos de práticas para demonstrar uma variedade de maneiras de coletar e processar informações.</p>
<p><i>uRisk Management for Roads in a Changing Climate: A Guidebook to the RIMAROCC Method</i> (ERA-NET ROAD, 2010).</p>	União Europeia	<p>A estrutura RIMAROCC permite a análise e o planejamento da adaptação a nível de sistema, corredor de transportes e ativos individuais, analisando vários "domínios de especialização", tais como pavimentos, bueiros e pontes, geotecnia, meio ambiente, drenagens e nível do mar. O RIMAROCC é um método onde o objetivo é facilitar a produção de um Estudo de Gerenciamento de Risco por ou para uma autoridade de transporte. O método pode ser usado para mitigar ameaças, reduzir vulnerabilidades e minimizar as consequências de um evento.</p>
<p><i>Climate Change Uncertainty and the State Highway Network: A Moving Target</i> (TRANSIT NEW ZEALAND, 2005).</p>	Nova Zelândia	<p>A Transit Nova Zelândia avaliou os impactos potenciais da mudança climática nas rodovias estaduais e desenvolveu uma resposta com base nas informações disponíveis. A Transit utilizou um processo de triagem em duas etapas para determinar a necessidade e a viabilidade de tomar medidas antecipadas para proteger a infraestrutura dos impactos potenciais futuros da mudança climática. A primeira etapa avaliou a necessidade de agir no presente. A avaliação revelou que a política e a prática atuais podem não ser suficientes para proteger adequadamente as pontes (e bueiros com uma vida útil de mais de 25 anos) dos impactos potenciais da mudança climática. A segunda etapa avaliou a viabilidade de agir agora para proteger as pontes rodoviárias estaduais dos impactos potenciais futuros da mudança climática.</p>

Estrutura	País de Origem	Descrição
<p><i>Scottish Road Network Climate Change Study</i> (SCOTTISH EXECUTIVE, 2005).</p>	Escócia	<p>As tendências da mudança climática na Escócia são examinadas para ver como elas podem afetar a rede de transporte, apresentadas a partir dos domínios de projeto, operação, pesquisa adicional e revisão de políticas. Os resultados mostram que a mudança climática no futuro próximo pode ser suficientemente significativa para justificar o ajuste das práticas atuais.</p>
<p><i>RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels</i> (BAST - BUNDESANSTALT FÜR STRABENWESEN, 2017).</p>	Alemanha	<p>A RIVA se concentra na avaliação dos riscos da mudança climática para a rede viária federal. O risco para a infraestrutura rodoviária decorrente da mudança climática é descrito por um modelo de indicador hierárquico e consiste em quatro dimensões: (i) Clima, (ii) Vulnerabilidade, (iii) Efeito Técnico e (iv) Criticidade. A metodologia desenvolvida permite uma análise/avaliação de risco em toda a rede com base em dados climáticos regionalizados e dados padronizados de infraestrutura de transportes.</p>
<p><i>Climate Change Risk Assessment</i> (U.K. HIGHWAYS AGENCY, 2012).</p>	Reino Unido	<p>A Estratégia e Estrutura de Adaptação à Mudança Climática da Agência de Rodovias do Reino Unido destina-se a identificar e gerenciar os riscos da mudança climática na infraestrutura rodoviária e nas operações de suas agências de transporte. A Estrutura busca responder a três questões-chave: 1. Qual é o nível atual e futuro de risco ou oportunidade? 2. O risco ou oportunidade está sendo gerenciado, levando em consideração as ações do governo e outras adaptações? 3. Existem benefícios de ações posteriores nos próximos cinco anos, além do que já está planejado?</p>
<p><i>National Climate Change Adaptation Framework</i> (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2021).</p>	Austrália	<p>A Estrutura Nacional de Adaptação à Mudança Climática, que tem um objetivo de avaliar os riscos da mudança climática na costa australiana, foi aprovada pelo Conselho de Governos Australianos (do inglês, <i>Council of Australian Governments - COAG</i>) em 2007. A Estrutura estabelece o que o governo australiano fará para apoiar os esforços em todos os níveis de governo, empresas e comunidade, para melhor antecipar, gerenciar e se adaptar aos impactos da mudança climática.</p>
<p>Projeto AdaptaVias (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2023).</p>	Brasil	<p>O Projeto AdaptaVias tem como objetivo conduzir um levantamento abrangente dos impactos e riscos resultantes das alterações climáticas na infraestrutura federal de transportes terrestres com base no AR5 (IPCC, 2014) e no AdaptaBrasil [s.n], tanto nas rodovias quanto nas ferrovias, tanto as já existentes quanto às planejadas. Este levantamento fornece informações essenciais para embasar</p>

Estrutura	País de Origem	Descrição
		decisões estratégicas visando a adaptação aos impactos provocados pela mudança climática.

Fonte: Baseado em Transit New Zealand (2005), Scottish Executive (2005), Era-Net Road (2010), U.K. Highways Agency (2012), U.S. Dot (2015), BASt (2017), Australian Government (2021), Galla (2021a) e Ministério dos Transportes (2023) e Abreu (2023).

Ao focar nas dimensões de infraestrutura física e ativos, a estratégia de adaptação visa não apenas entender os desafios iminentes, mas também promover soluções inovadoras para fortalecer a resiliência do sistema, incluindo a implementação de tecnologias avançadas, práticas sustentáveis e a integração de abordagens eficazes de gestão de riscos. Isso não apenas fortalece a capacidade de resposta à mudança climática, mas também contribui para a promoção da sustentabilidade ambiental e para a redução do impacto negativo das atividades humanas no meio ambiente.

Nesse sentido, a integração de políticas e regulações internacionais desempenha um papel fundamental para assegurar que essas estratégias de adaptação sejam amplamente eficazes. Essa eficácia das metodologias de ARC no setor de transportes está intrinsecamente ligada à existência de diretrizes globais que orientam as práticas locais e regionais. O Acordo de Paris e as diretrizes do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) são exemplos de marcos regulatórios que influenciam diretamente as estratégias de adaptação climática, promovendo a harmonização das abordagens entre diferentes países. Ao alinhar as práticas de ARC com essas políticas internacionais, as nações não só fortalecem a resiliência de suas infraestruturas de transporte, mas também contribuem para os esforços globais de mitigação e adaptação climática (IPCC, 2014; UNECE, 2021).

Além disso, o impacto econômico das estratégias de adaptação emerge como um componente essencial nas metodologias de ARC para o setor de transportes. Embora os custos iniciais para a implementação de medidas adaptativas possam ser substanciais, esses investimentos são amplamente compensatórios a longo prazo. A resiliência aumentada da infraestrutura de transporte pode prevenir danos catastróficos resultantes de eventos climáticos extremos, reduzindo significativamente os custos associados a reparos emergenciais e manutenção. A mitigação dos riscos climáticos também evita interrupções no fluxo de mercadorias e pessoas, minimizando as perdas econômicas indiretas. Cada dólar investido em infraestrutura resiliente pode evitar até sete dólares em custos relacionados a desastres futuros (HALLEGATTE *et al.*, 2016). Esse retorno econômico positivo destaca a importância de integrar considerações de custo-benefício nas metodologias de ARC, assegurando que as estratégias de adaptação

não apenas protejam as infraestruturas, mas também maximizem o retorno sobre o investimento, tanto em termos econômicos quanto sociais.

Essa perspectiva econômica torna-se ainda mais relevante nos países em desenvolvimento, que enfrentam desafios significativos na implementação de estratégias de ARC no setor de transportes, mas também dispõem de oportunidades únicas para promover a inovação e o crescimento sustentável. A escassez de recursos financeiros, a limitada capacidade técnica e a falta de dados climáticos detalhados são obstáculos comuns que dificultam a adaptação eficaz das infraestruturas de transporte nesses contextos. Entretanto, esses países têm a possibilidade de incorporar práticas de adaptação desde as fases iniciais de desenvolvimento, evitando os erros históricos cometidos pelos países desenvolvidos e adotando abordagens mais resilientes e sustentáveis. Ademais, a colaboração internacional e o financiamento através de mecanismos como o Fundo Verde para o Clima proporcionam suporte essencial para superar essas barreiras. Ao adotar soluções inovadoras e contextualmente adequadas, os países em desenvolvimento podem não apenas proteger suas infraestruturas contra os impactos das mudanças climáticas, mas também promover um desenvolvimento econômico sustentável e inclusivo (AGRAWALA; FANKHAUSER, 2008; HALLEGATTE; RENTSCHLER; ROZENBERG, 2016).

A convergência entre resiliência climática e sustentabilidade ambiental, por sua vez, constitui outro aspecto fundamental na ARC para o setor de transportes, provavelmente o mais importante deles. A resiliência diz respeito à capacidade das infraestruturas de transporte de resistir, adaptar-se e recuperar-se rapidamente dos impactos adversos das mudanças climáticas, enquanto a sustentabilidade enfatiza o desenvolvimento dessas infraestruturas de modo a minimizar os impactos negativos sobre o meio ambiente. A integração desses conceitos nas metodologias de ARC assegura que as estratégias de adaptação não apenas protejam as infraestruturas contra eventos climáticos extremos, mas também promovam práticas que reduzam as emissões, utilizem recursos de maneira eficiente e preservem os ecossistemas naturais. Abordagens de adaptação que incorporam princípios de sustentabilidade não só melhoram a resiliência das infraestruturas, mas também contribuem para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo um desenvolvimento urbano e rural mais equilibrado e sustentável (FIGUEROA; ROTMANS, 2017; CHESTER; ALLENBY, 2019).

Conforme discutido anteriormente, a eficácia dessa abordagem de adaptação está intrinsecamente vinculada ao gerenciamento organizacional, o qual desempenha um papel central em sua implementação bem-sucedida. A criação de estruturas organizacionais robustas, que facilitem a tomada de decisões informadas e a coordenação eficiente das atividades de adaptação, é fundamental para promover uma cultura institucional orientada à resiliência climática. Esse fortalecimento organizacional, por sua vez, aprimora a capacidade das instituições de responderem de maneira eficaz às mudanças ambientais, assegurando a

sustentabilidade a longo prazo. De modo geral, as estruturas organizacionais desenvolvidas globalmente seguem etapas semelhantes às descritas na Tabela 3, refletindo um consenso sobre as melhores práticas na promoção da resiliência climática.

Tabela 3. Etapas comuns das estruturas desenvolvidas ao redor do mundo.

Passos	Descrição
Etapa 1 - Estabelecimento do Contexto	Nessa etapa, são definidos as metas e os objetivos da ARC, é realizada a coleta de dados de infraestrutura e dados climáticos projetados, e são criados workshops ou painéis de especialistas na área (incluindo engenheiros rodoviários, gerentes de ativos, profissionais de adaptação à mudança climática, gerentes de inovação e gerentes de projeto) para entender a realidade a qual a análise está inserida.
Etapa 2 - Identificação de risco	Esta etapa busca identificar os riscos da mudança climática, que leva em consideração a exposição das infraestruturas às ameaças climáticas e suas vulnerabilidades (sensibilidades e capacidades adaptativas). Isto envolve a identificação de áreas de foco regional ou prioridades, bem como os principais sistemas de infraestrutura afetados.
Etapa 3 - Análise de Risco	Para a análise de risco, as características do impacto climático recebem classificações qualitativas (por exemplo, baixa, média, alta). Geralmente essa etapa consiste apenas no cálculo da probabilidade de ocorrência do risco e suas consequências. Outros aspectos são analisados em casos específicos.
Etapa 4 - Avaliação de risco	Inicialmente, é necessário categorizar os resultados da análise de risco para estabelecer as prioridades de adaptação. Esse processo envolve a inserção dos dados da fase anterior em uma matriz de risco, que utiliza um sistema de coordenadas cartesianas. Nessa matriz, variáveis como probabilidade, consequência/criticidade e impacto são associadas aos efeitos das mudanças climáticas. Posteriormente, a matriz é minuciosamente analisada, e os riscos são hierarquizados. A pontuação de prioridade de risco é determinada com base na combinação de probabilidade e impacto, sendo que maior probabilidade e impacto resultam em uma pontuação de prioridade mais elevada. Existem diversas tipologias de matrizes, desde as mais simples, que categorizam áreas discretas de baixo a médio risco, até matrizes mais elaboradas ou multidimensionais. Em alguns casos, as Etapas 3 e 4 podem ser integradas em uma única fase denominada avaliação de risco.
Etapa 5 - Tratamento do Risco	Para o tratamento de riscos, deve-se identificar, avaliar e selecionar as escolhas de medidas de adaptação, e implementar a opção escolhida. No processo de identificação das estratégias de mitigação dos riscos para posterior avaliação e escolha podem ser utilizadas tabelas com classes genéricas de possibilidades de adaptação. Já para a implementação, pode-se estabelecer uma estrutura de monitoramento para coleta de dados sobre o clima, desempenho dos ativos e operações. É crucial a conexão entre o planejamento da ação adaptativa à mudança climática analisada, com os programas de gestão de ativos de transporte.

Fonte: Baseado em Galla (2021a) e Abreu (2023).

Muitas agências definiram as restrições de suas estruturas de adaptação baseadas em risco, bem como os obstáculos internos e externos que podem impedir a implementação da estrutura, ao mesmo tempo em que abordam o desenvolvimento destas, conforme expresso na Tabela 4. Essa abordagem visa não apenas a compreensão dos desafios envolvidos, mas também a formulação de estratégias eficazes para superá-los, tornando o processo de adaptação mais robusto e eficiente.

Tabela 4. Restrições e obstáculos das estruturas de ARC de agências de transporte ao redor do mundo.

Dificuldade	Descrição
Limitações de dados de ativos de infraestrutura ou climáticos	Essa é a principal barreira para a maioria das estruturas, sendo categorizada de acordo com a disponibilidade e acessibilidade em: (i) não disponíveis (que não foram coletados); (ii) inconsistentes (apesar de terem sido coletados, não estão completos ou padronizados); e (iii) de difícil acesso (não estão disponíveis em bases de dados de acesso aberto, apesar de existirem em bases de empresas privadas - por exemplo concessionárias).
Tratamento de riscos	A determinação dos níveis de risco considerados aceitáveis, a importância atribuída às diversas categorias de risco e seus limites – isto é, a maneira como o risco é percebido e classificado – também foram obstáculos relevantes no ponto de vista de diversas autoridades. Mostrava desafiador inclusive para os tomadores de decisão estabelecer uma relação clara entre a necessidade imediata de ação e os riscos de longo prazo ou de efeito distante.
Disponibilidade de recursos suficientes	De acordo com as agências, não havia meios financeiros suficientes para realizar o planejamento de adaptação ou para construir ou melhorar as estruturas de planejamento de adaptação, bem como, recursos humanos adequados para planejar as medidas de adaptação, e existe uma relação direta entre a carência de mão-de-obra e a falta de recursos financeiros, já que receitas adicionais permitiriam a contratação de pessoal qualificado adicional.
Barreiras legais, políticas e regulatórias	As agências de transporte enfrentam desafios ao tentar identificar os riscos associados à mudança climática, frequentemente devido à falta de compreensão dos riscos climáticos específicos que enfrentam. Adicionalmente, empresas de transporte privadas e independentes deparam-se com obstáculos regulatórios, uma vez que a aprovação de seus projetos de financiamento ou investimento requer a autorização de órgãos governamentais.
Demanda futura de transporte incerta do sistema	Para as agências, é difícil avaliar a necessidade de medidas adaptativas quando não se tem clareza sobre as demandas futuras de transportes, e as mesmas precisam fazer suposições acerca de tais demandas, de tal modo que a incerteza em torno das exigências de medidas de adaptação à mudança climática acaba sendo ampliada pelas incertezas em torno das exigências futuras de demanda. Desse modo, algumas agências (como a Agência Australiana de Transportes) optaram por não incluir os efeitos da mudança climática na demanda de viagens, concentrando seus esforços nos impactos físicos sobre a infraestrutura e os ativos.

Fonte: Baseado em Galla (2021a) e Abreu (2023).

Os resultados apresentados na Tabela 4 revelam que a adaptação do setor de transporte à mudança climática enfrenta diversas barreiras. A escassez e a inconsistência nos dados de ativos de infraestrutura e climáticos dificultam tanto a coleta quanto a análise necessária. Adicionalmente, a gestão de riscos enfrenta desafios na definição de níveis aceitáveis e na clareza da relação entre a urgência de ação e os riscos de

longo prazo. A insuficiência de recursos financeiros e humanos, juntamente com barreiras legais e regulatórias, agrava ainda mais o planejamento e a implementação de medidas adaptativas. A incerteza em relação à demanda futura de transporte adiciona uma camada adicional de complexidade, levando algumas agências a optar por não considerar os efeitos da mudança climática nesse aspecto. Superar essas barreiras exigirá esforços colaborativos, melhorias na coleta de dados e o desenvolvimento de políticas adaptativas eficazes.

Superar essas barreiras críticas exigirá esforços colaborativos entre diversos setores e partes interessadas, bem como um aprimoramento substancial na coleta e análise de dados históricos (ABREU, 2023). A cidade de Copenhague, por exemplo, adotou uma abordagem colaborativa para a adaptação climática, integrando planejamento urbano, tecnologias de ponta e participação comunitária, o que resultou em uma resiliência significativamente aprimorada contra inundações urbanas. Esse exemplo demonstra que a superação das barreiras mencionadas é viável por meio de uma abordagem integrada e inovadora (JENSEN; KROGSTRUP, 2019). Ademais, é essencial o desenvolvimento de políticas adaptativas eficazes, capazes de ajustar-se dinamicamente à mudança climática em constante evolução (ABREU; SANTOS; MONTEIRO, 2022). Essa abordagem dinâmica, que combina cooperação ampla, dados robustos e políticas ágeis, é fundamental para enfrentar os desafios complexos e interconectados associados aos impactos da mudança climática (ABREU; RIBEIRO; SANTOS, 2021a; ABREU; RIBEIRO; SANTOS, 2021b). A busca por soluções sustentáveis e resilientes deve ser orientada por uma visão de longo prazo, visando não apenas a mitigação, mas também a adaptação efetiva para garantir a sustentabilidade do planeta diante das transformações ambientais (SANTOS *et al.*, 2021).

É fundamental que as políticas adaptativas integrem princípios de equidade e justiça climática, garantindo que as comunidades mais vulneráveis, frequentemente as mais impactadas pelas mudanças climáticas, sejam devidamente consideradas e beneficiadas pelas estratégias de adaptação (SCHLOSBERG; COLLINS; NIEMEYER, 2017). Essa abordagem promove um pensamento que transcende as fronteiras setoriais e regionais, estabelecendo conexões entre os fatores de risco físicos e socioeconômicos. Avançar na avaliação dos riscos da mudança climática dessa maneira é essencial para uma tomada de decisão mais informada, visando à redução dos impactos negativos da mudança climática (SIMPSON *et al.*, 2021).

5 Considerações Finais

A infraestrutura viária representa um ativo essencial para governos e economias globais, desempenhando um papel crucial no transporte de alimentos, bens de consumo e na facilitação das deslocamentos humanos para trabalho, estudo e outras atividades. Estudos anteriores têm demonstrado que a integridade e a segurança dessa infraestrutura podem ser significativamente comprometidas durante eventos climáticos extremos ou prolongados. Isso enfatiza a urgência de integrar considerações sobre mudança

climática em projetos convencionais, abrangendo toda a vida útil de pavimentos, pontes e sistemas de drenagem, entre outras estruturas, a fim de garantir sua resiliência diante dos desafios climáticos.

Este estudo reveste-se de grande importância para formuladores de políticas públicas e outras partes interessadas por várias razões. Primeiramente, ele proporciona uma compreensão aprofundada das metodologias de ARC no setor de transportes, permitindo que os formuladores de políticas entendam melhor os desafios e oportunidades associados à adaptação às mudanças climáticas. Ao destacar as vantagens e identificar desafios específicos dessas metodologias, o estudo capacita esses formuladores a tomar decisões informadas e estratégicas para fortalecer a resiliência da infraestrutura de transporte. A abordagem integrada enfatizada no estudo é igualmente crucial, oferecendo uma visão holística que facilita a formulação de políticas abrangentes e eficazes, em consonância com diretrizes internacionais como as estabelecidas pelo Acordo de Paris e pelo IPCC.

A consideração abrangente dos elementos essenciais em uma ARC fornece uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias que abordem não apenas os impactos imediatos, mas também os desafios de longo prazo relacionados à mudança climática no setor de transporte. Em última análise, esse conhecimento é fundamental para a criação de políticas públicas que promovam a sustentabilidade, a segurança e a eficiência no transporte, beneficiando a sociedade como um todo. A integração de princípios de equidade e justiça climática nas políticas adaptativas garantirá que as comunidades mais vulneráveis também se beneficiem dessas estratégias, contribuindo para um desenvolvimento mais equilibrado e inclusivo.

Referências

ABREU, V. H. S. *et al.* **Identificação De Ameaças E Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura De Transporte Rodoviário.** *MIX Sustentável*, v. 8, n. 3, p. 142–156, 31 maio 2022.

ABREU, V. H. S. *et al.* **Climate Change Adaptation Strategies for Road Transportation Infrastructure: A Systematic Review on Flooding Events.** *Em: [s.l: s.n.].* p. 5–30, 2023.

ABREU, V. H. S. *et al.* **Implications of Climate Change for the Brazilian Road Infrastructure.** *Em: COVID-19 and Climate Change in BRICS Nations.* [s.l: s.n.], 2023.

ABREU, V. H. S. **Diretrizes Para Um Plano Setorial De Adaptação Da Infraestrutura Rodoviária Brasileira Frente Aos Possíveis Impactos Da Mudança Do Clima.** 2023.

ABREU, V. H. S.; RIBEIRO, F. B.; SANTOS, A. S. **Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura De Transporte Rodoviário À Base De Revisão Bibliográfica.** 35º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. *Anais...2021*

ABREU, V. H. S.; RIBEIRO, F. B.; SANTOS, A. S. **Impactos da Mudança Climática na Infraestrutura de Transporte Terrestre à Luz de Revisão Bibliográfica com Abordagem Bibliométrica.** *Via Viva*, v. 4, n. 1, p. 20–35, 2021.

- ABREU, V. H. S.; RIBEIRO, F. B.; SANTOS, A. S. Identificação de Indicadores de Vulnerabilidade para Análise de Risco Climático da Infraestrutura Rodoviária. *Em: Via Viva* 2022. [s.l: s.n.], 2022.
- ABREU, V. H. S.; SANTOS, A. S.; MONTEIRO, T. G. M. **Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure: A Systematic Review on Adaptation Measures**. *Sustainability*, v. 14, n. 14, p. 8864, 20 jul. 2022.
- ACHEBE, J. *et al.* **Incorporating Flood Hazards into Pavement Sustainability Assessment**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2675, n. 10, p. 1025–1042, 29 out. 2021.
- ACHEBE, J.; UGOCHUKWU, U.; EZE, A. R. **Sustainable Road Infrastructure Management in Developing Countries: Challenges and Prospects**. *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 10, n. 1, p. 10-21, 2021.
- ADAPTABRASIL MCTI. **Sobre o AdaptaBrasil**.
- AGRAWALA, S.; FANKHAUSER, S. *Economic Aspects of Adaptation to Climate Change: Costs, Benefits and Policy Instruments*. Paris: OECD, 2008.
- AUERBACH, M.; HERRMANN, C. *Adaptation of the Road Infrastructure to Climate Change*. *Em: Materials and Infrastructures* 2. [s.l.] Wiley, 2016. p. 193–206, 2016.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT. **National Climate Change Adaptation Framework**. [s.l: s.n.], 2021.
- BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (BAST). **Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels - RIVA**. [s.l: s.n.], 2017.
- CHAUSSON, A. *et al.* **Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation**. *Global Change Biology*, v. 26, n. 11, p. 6134–6155, 9 nov. 2020.
- CHESTER, M. V.; ALLENBY, B. R. *Infrastructure as a Global Challenge: Resilience, Sustainability, and the 21st Century*. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 25, n. 2, p. 04019012, 2019.
- ECONOMICS OF CLIMATE ADAPTATION WORKING GROUP. *Shaping Climate-Resilient Development: A Framework for Decision-Making*. ClimateWorks Foundation, Global Environment Facility, European Commission, McKinsey & Company, The Rockefeller Foundation, Standard Chartered Bank, and Swiss Re, 2009.
- ERA-NET ROAD. **Risk Management For Roads In A Changing Climate**. A Guidebook to the RIMAROCC Method. [s.l: s.n.], 2010.
- EVANS, C.; TSOLAKIS, D.; NAUDÉ, C. *Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations*. ATRF Conference. **Anais...2009**.
- EVANS, M.; TSOLAKIS, D.; NAUDÉ, C. *Climate Change and Transport: Managing Impacts on Transport Infrastructure*. Canberra: Austroads Incorporated, 2009.
- FIGUEROA, A.; ROTMANS, J. *Integrating Climate Change Resilience and Sustainability in Transportation Infrastructure*. *Journal of Cleaner Production*, v. 154, p. 334-345, 2017.

- GALLA, K. K. **Climate Change Risk Assessment of Road Infrastructure for the Town of Essex**. [s.l: s.n.], 2021.
- GALLA, P. S. Resilience of Road Infrastructure to Climate Change: A Systematic Review of Impacts and Adaptation Strategies. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 27, n. 2, p. 04021010, 2021.
- GHADGE, A.; WURTMANN, H.; SEURING, S. **Managing climate change risks in global supply chains: a review and research agenda**. *International Journal of Production Research*, v. 58, n. 1, p. 44–64, 2 jan. 2020.
- HALLEGATTE, S.; RENTSCHLER, J.; ROZENBERG, J. **The Triple Dividend of Resilience: Realizing Development Goals through the Multiple Benefits of Disaster Risk Management**. Washington, DC: World Bank, 2016.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Marlborough, MA, USA, 2014.
- IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Cambridge University Press, 2014.
- MARKOLF, S. A. *et al.* **Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness**. *Transport Policy*, v. 74, p. 174–186, fev. 2019.
- MARKOLF, S. A.; CHELSEA, C. W.; BROOKS, S. Vulnerability of transportation infrastructure to climate change: Expanding a framework for adaptation planning. *Climatic Change*, v. 153, n. 3, p. 235-252, 2019.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Projeto AdaptaVias. Impactos e riscos da mudança do clima nos setores rodoviário e ferroviário**. 2023
- PÉREZ-MORALES, A.; GOMARIZ-CASTILLO, F.; PARDO-ZARAGOZA, P. **Vulnerability of Transport Networks to Multi-Scenario Flooding and Optimum Location of Emergency Management Centers**. *Water*, v. 11, n. 6, p. 1197, 8 jun. 2019.
- QUINN, A. *et al.* **Adaptation Becoming Business as Usual: A Framework for Climate-Change-Ready Transport Infrastructure**. *Infrastructures*, v. 3, n. 2, p. 10, 17 abr. 2018.
- SANTOS, A. S. *et al.* **An Overview on Costs of Shifting to Sustainable Road Transport: A Challenge for Cities Worldwide**. [s.l: s.n.]. p. 93–121, 2021.
- SCOTTISH EXECUTIVE. **Scottish Road Network Climate Change Study**, 2005.
- SIMPSON, N. P. *et al.* **A framework for complex climate change risk assessment**. *One Earth*, v. 4, n. 4, p. 489–501, abr. 2021.
- THE WORLD BANK. **Integrating Climate Change into Road Asset Management**. Washington DC 20433: [s.n.].
- TRANSIT NEW ZEALAND. **Climate Change Uncertainty and the State Highway Network: A Moving Target**. [s.l: s.n.], 2005.

UNECE. United Nations Economic Commission for Europe. Climate Change Adaptation in Transport. United Nations, 2021.

U.K. HIGHWAYS AGENCY. **UK Climate Change Risk Assessment: Government Report.** [s.l: s.n.], 2012.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (U.S. DOT). **Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework.** [s.l: s.n.], 2015.

WANG, T. *et al.* **Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation and planning.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 88, p. 102553, nov. 2020.