

IDENTIFICAÇÃO DE AMEAÇAS E IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO

IDENTIFICATION OF CLIMATE CHANGE THREATS AND IMPACTS ON ROAD TRANSPORT INFRASTRUCTURE

VICTOR HUGO SOUZA DE ABREU, MSc. | Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

THAÍS GUEDES MÁXIMO MONTEIRO | Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

FILIFE BATISTA RIBEIRO, MSc. | Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

ANDREA SOUZA SANTOS, Dra. | Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil

RESUMO

A infraestrutura de transporte rodoviário é um dos ativos que mais sofre e continuará sofrendo com os impactos da mudança climática, tendo em vista o prosseguimento do aquecimento global. Notadamente, as redes de transporte são essenciais para a economia e a sociedade e sua adaptação à mudança climática é necessária. Nesse sentido, este artigo tem como objetivo identificar os principais impactos de ameaças climáticas na infraestrutura de transporte rodoviário. Durante a revisão da literatura (fundamentada em buscas diretas em bases de dados e em buscas documentais), foi possível identificar cerca de 60 potenciais impactos das 12 ameaças climáticas analisadas, que acarretam prejuízos de diferentes magnitudes que vão desde danos mais superficiais no pavimento até colapso da plataforma rodoviária. Além disso, considerações importantes sobre medidas de adaptação são realizadas com atenção especial à Análise de Risco Climático e uma maior conscientização e engajamento de partes interessadas

142

PALAVRAS-CHAVE: Mudança Climática; Infraestrutura; Transporte Rodoviário; Ameaças; e Impactos.

ABSTRACT

Road transport infrastructure is one of the assets that is suffering and will continue to suffer the most from the impacts of climate change as global warming continues. Notably, transportation networks are essential to the economy and society and their adaptation to climate change is necessary. Thus, this paper aims to identify the main impacts of climate threats on road transport infrastructure. During the literature review (based on direct database searches and documentary searches), it was possible to identify about 60 potential impacts of the 12 climate threats analyzed, which cause damages of different magnitudes ranging from more superficial sidewalk damage to road platform collapse. In addition, important considerations on adaptation measures are made with special attention to Climate Risk Assessment and increased awareness and stakeholder engagement.

KEYWORDS: Climate change; Infrastructure; Road Transport; Threats; and Impacts.



1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária (estradas e rodovias e estruturas de apoio como Obras de Arte Corrente - pontes, por exemplo, - e Obras de Arte Especiais - sistemas de drenagem), que se constitui em um importante ativo de capital para qualquer nação, visto que sustenta a mobilidade e as atividades humanas (MITOULIS *et al.*, 2021), é normalmente projetada para resistir aos padrões climáticos típicos. Entretanto, os impactos da mudança climática atual e futura (curto, médio e longo prazo) podem reduzir a eficiência das operações de transporte e a capacidade da infraestrutura de resistir a eventos extremos fora do limite "típico", possivelmente resultando em deterioração prematura, perda de vida útil, ou falha da infraestrutura (EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ, 2009; BOLLINGER *et al.*, 2014).

Dessa forma, os tomadores de decisão (projetistas de estradas e rodovias, gestores de ativos e planejadores, por exemplo), responsáveis por determinarem quando e onde a infraestrutura de transporte rodoviário deve ser desenvolvida e/ou aprimorada, estão enfrentando um novo desafio com o tópico emergente da mudança climática (CHINOWSKY & ARNDT, 2012; SCHWEIKERT *et al.*, 2014b; BHAMIDIPATI, 2015; WANG *et al.*, 2019). Isso porque, como a infraestrutura rodoviária requer um grande investimento, torna-se fundamental a construção de um sistema de gestão que atenda as mudanças futuras (HIRA & CHAI, 2015).

Atualmente, há uma tendência crescente na elaboração de estudos - entretanto ainda escassos - para avaliar e documentar os impactos da mudança climática na infraestrutura de transporte (WANG *et al.*, 2020a, 2020b; VAJJARAPU & VERMA, 2021), fornecendo orientações sobre os tipos de impactos potenciais, bem como analisando possíveis estratégias para adaptação a esses impactos em suas políticas públicas, planejamento e projetos (MALLICK *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2019). A adaptação é uma resposta necessária e indispensável para diminuir os impactos climáticos dinâmicos e os riscos climáticos mais frequentes e rigorosos previstos para ocorrerem nos próximos anos (VAJJARAPU & VERMA, 2021).

Servindo a esse propósito, o artigo tem como objetivo realizar um apanhado geral de estudos para identificação dos principais impactos da mudança climática na infraestrutura de transporte rodoviário, por meio da revisão de literatura atual, elaborada através de buscas diretas em bases de dados e buscas documentais

em importantes organismos científicos brasileiros e internacionais. Além disso, um destaque especial é dado à importância do estabelecimento da análise de risco climático e adaptação para fornecer apoio aos tomadores de decisão e gestores de ativos da infraestrutura rodoviária na minimização dos impactos da mudança climática. Estudos como esse representam um passo importante para entendimento dos impactos potenciais da mudança climática na infraestrutura e desenvolvimento de estratégias adequadas para lidar com eles (BOLLINGER *et al.*, 2014).

Para cumprir seus objetivos, além dessa seção introdutória, o estudo encontra-se assim dividido: a Seção 2 apresenta o procedimento metodológico necessário à condução eficiente da pesquisa; a Seção 3 expõe a problemática; a Seção 4 trata das principais ameaças e seus impactos correspondentes; a Seção 5 aborda a importância da análise de risco climático; a Seção 6 disserta sobre a adaptação; e, por fim, a Seção 7 apresenta as considerações finais.

2. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A necessidade de se entender os impactos da mudança climática tem levado pesquisadores e estudiosos em todo o mundo a desenvolverem cada vez mais estudos sobre a temática, o que acaba por tornar o trabalho de curadoria dos conteúdos mais relevantes um grande desafio. Diante disso e visando obter informações pertinentes acerca dos impactos da mudança climática na infraestrutura de transporte rodoviário, foram identificados e analisados os estudos relevantes (qualidade e aplicabilidade) sobre a tônica.

O procedimento metodológico adotado nesse estudo consiste em uma revisão abrangente da literatura sobre impactos da mudança climática na infraestrutura de transporte rodoviário, tendo em vista que a infraestrutura de transporte é particularmente vulnerável aos impactos climáticos (PICKETTS *et al.*, 2016). Esta revisão, que engloba artigos relevantes publicados preferencialmente na última década, fornece aos pesquisadores (i) a identificação das questões emergentes e de temas associados; (ii) como essas preocupações e temas se desencadearam e (iii) quais são os desafios a serem enfrentados no futuro.



Figura 1. Procedimento mercadológico.
Fonte: elaboração própria (2022).

Para obtenção dos principais estudos e criação do repositório de pesquisa, foram realizadas buscas documentais em importantes meios de informação de organismos científicos e iniciativas nacionais e internacionais que tratam da temática da mudança climática. Além disso, para aprimorar ainda mais a fundamentação teórica, realizou-se buscas diretas nas três principais bases de dados internacionais (Web of Science, ScienceDirect e Scopus) - com cobertura e alcance satisfatórios -, por meio de combinações entre palavras-chave relacionadas à mudança climática e ao transporte rodoviário, obtidas em um processo de brainstorming. A Figura 1 ilustra o procedimento adotado para essa atividade.

Vale destacar que, antes de incluir diretamente no repositório de pesquisa os estudos obtidos, foram realizadas: (i) uma triagem preliminar, considerando critérios de inclusão (prestígio da fonte e o ano de publicação - com preferência para os estudos publicados nos últimos 10 anos); e (ii) uma triagem final, considerando critérios de qualificação, que são: a inovação para o estado da arte, a discussão das limitações e o fato dos resultados serem condizentes com os objetivos pré-estabelecidos.

No processamento de dados, há a consolidação e organização dos elementos resultantes da elaboração de informações técnicas e análises sobre os impactos da mudança climática na infraestrutura de

transporte rodoviário. Como diferentes bases de dados podem fornecer estudos iguais, empregou-se o uso do software gerenciador bibliográfico EndNote, para organização dos dados e remoção de conteúdo duplicado. Nessa etapa, obteve-se o repositório final de pesquisa, necessário para as análises bibliográficas posteriores, composto por cerca de 65 estudos relevantes sobre a temática. Por fim, há o desenvolvimento do relatório de pesquisa, aqui expresso como forma de artigo, contendo o conhecimento produzido a partir das análises da pesquisa.

3. PROBLEMÁTICA

A mudança climática, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*, em inglês), é inequívoca e já vem sendo observada em diversos países, tanto desenvolvidos como em desenvolvimento. Resultante de um aumento na temperatura média global do planeta que, até 2019, foi de 1,1°C acima dos níveis pré-industriais (WMO, 2019), a mudança climática é caracterizada pela ocorrência de eventos climáticos extremos, tais como ondas de calor, tempestades e precipitações intensas que estão se tornando mais frequentes e severos (SANTOS; RIBEIRO; DE ABREU, 2021).

A resposta global à ameaça da mudança climática tem sido por meio da mitigação, reduzindo as emissões de Gases de Efeito Estufa

(GEE) (HUNT & WATKISS, 2011; IPCC, 2014). No entanto, alguns dos efeitos da mudança climática são inevitáveis e a adaptação é vista como um meio necessário para lidar com esses efeitos imprevisíveis, a fim de minimizar as perdas humanas e econômicas (VAJJARAPU; VERMA; GULZAR, 2019). Em comparação com as estratégias de mitigação, as estratégias de adaptação aceitam o status quo da mudança climática e se esforçam para fortalecer a resiliência dos sistemas de transporte (NG *et al.*, 2018), conforme nota-se na Figura 2.



Figura 2. Relação entre mitigação e adaptação. Fonte: Adaptado de LOCATELLI (2011).

As economias globais e locais dependem de movimentos oportunos e confiáveis de pessoas e cargas. Dessa forma, as interrupções nos sistemas de transporte, acarretadas pelos impactos da mudança climática na infraestrutura de transporte, contribuem para perdas humanas e econômicas (ARNDT *et al.*, 2012; PICKETTS *et al.*, 2016).

A mudança climática impacta todos os aspectos da infraestrutura de transporte, incluindo onde está localizada e como é projetada, construída e mantida (TAC, 2013). No entanto, a maior parte das infraestruturas foram concebidas, construídas e mantidas erroneamente com a premissa de que o clima futuro seria semelhante ao vivido no passado (HIRA & CHAI, 2015).

Os pavimentos são, frequentemente, projetados com base nos padrões de umidade e temperatura (refletindo a história do clima local) e os materiais usados para construção são constantemente selecionados com base em um clima estacionário. Entretanto, com a mudança climática projetada para as próximas décadas,

um pavimento pode estar sujeito a condições climáticas muito diferentes ao longo de sua vida útil do que era originalmente esperado (SHAO; JENKINS; OH, 2017; UNDERWOOD *et al.*, 2017).

Nesse sentido, a mudança climática apresenta impactos dispendiosos em termos de manutenção, reparos e perda de conectividade. Ainda assim, muitos desses impactos podem ser mitigados ou evitados por medidas de adaptação pró-ativas e de manutenção precoce que reduzam a sensibilidade e aumentem a capacidade adaptativa (aspectos intrínsecos a vulnerabilidade), sendo essa uma consideração crucial para proteção dos investimentos atuais e futuros em infraestrutura e das funções econômicas, sociais e outras que eles desempenhem (SCHWEIKERT *et al.*, 2014a).

Assim, o aumento da resiliência urbana está se tornando uma das principais prioridades dos planejadores em todos os níveis de governo e da sociedade (BOLLINGER *et al.*, 2014). Isso porque a infraestrutura que mantém todas as suas funções, mesmo sob estresse, seja ele climático de longo prazo ou eventos extremos, pode melhorar a capacidade das comunidades de resistir, responder e se recuperar desses eventos (SCHWEIKERT; ESPINET; CHINOWSKY, 2018).

Os impactos da mudança climática estão destacando questões potencialmente agravantes aos desafios existentes e adicionando tensões não planejadas às redes de transportes que já estão se degradando, mesmo sem a formalização de considerações sobre a mudança climática (SCHWEIKERT; ESPINET; CHINOWSKY, 2018).

Nesse sentido, servindo ao propósito de identificar quais são as principais ameaças climáticas que afetam a infraestrutura de transporte rodoviário e seus principais impactos, a Seção 4 traz um compilado de estudos sobre a temática. Além disso, uma visão geral sobre a necessidade de realização de Análise de Risco Climático e implementação de medidas de adaptação é realizada, respectivamente, nas Seções 5 e 6, para orientar os tomadores de decisão de transportes.

4. OS IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Diversos estudos mostraram que, durante eventos climáticos extremos, a integridade e a segurança da infraestrutura rodoviária podem ser comprometidas, levando muitas vezes à deterioração, interrupção e incidentes inseguros (MITSAKIS *et al.*, 2014; DIKANSKI *et al.*, 2016; PICKETTS *et al.*, 2016), podendo também

impactar em alternâncias e/ou cancelamentos de viagens (KOETSE & RIETVELD, 2009).

Além disso, é evidente a redução da vida útil do pavimento em função dos impactos da mudança climática, destacando a necessidade de considerá-las em projetos regulares da infraestrutura rodoviária que reflitam todas as etapas de sua vida útil (MALLICK *et al.*, 2014; DAWSON, 2014; MNDawe *et al.*, 2015; SWARNA & HOSSAIN, 2022). Os potenciais impactos que podem ser ocasionados pelos riscos climáticos à infraestrutura de transporte rodoviário são apresentados no Quadro 1

No Quadro 1, é possível notar que diversas ameaças climáticas (tais como altas temperaturas/ondas de calor, precipitação intensa, secas prolongadas, elevação do nível do mar, ventos fortes, etc.) podem acarretar numa quantidade significativa de impactos na infraestrutura rodoviária. E, dessa forma, originar problemas de diferentes naturezas e escalas que precisam ser analisados caso a caso, dependendo de uma ampla gama de variáveis e não sendo igualmente distribuídos pela paisagem (SHAO; JENKINS; OH, 2017). Ressalta-se que essas ameaças têm ainda consequência na operação do transporte rodoviário, perspectiva não contemplada nesse estudo.

Cabe destacar ainda que, embora os impactos mais amplos devam ser incluídos no processo de

tomada de decisão, eles são frequentemente subestimados, principalmente em países em desenvolvimento, devido à dificuldade em se criar uma justificativa de custo-benefício no planejamento e orçamentos de curto e médio prazo (SCHWEIKERT *et al.*, 2014b).

As considerações de projeto relacionadas à presença de água e as forças adicionais aplicadas às estruturas de engenharia devido às ações das ondas e tempestades parecem ser as mais urgentes no curto prazo. No longo prazo, as mudanças de temperatura, o aumento da faixa de temperatura durante um ano típico e as cargas de vento tornam-se considerações adicionais importantes (MEYER, 2008).

A infraestrutura rodoviária é um investimento de longa duração e a compreensão dos impactos esperados da mudança climática futura por projetistas de estradas e rodovias, gestores de ativos e planejadores pode produzir economias de custo consideráveis a longo prazo (SHAO; JENKINS; OH, 2017; O'CONNOR, 2020). Diante do atual cenário de condições climáticas e seus impactos relacionados, medidas de adaptação, precedidas por análise de risco climático, são necessárias para redução dos riscos e minimização dos impactos, especialmente sobre a infraestrutura de transportes (MCGREGOR; HASSAN; HAYLEY, 2008).

Quadro 1 - Potenciais impactos de ameaças climáticas no transporte rodoviário.
 Fonte: autores.

Ameaças Climáticas	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
Altas temperaturas e ondas de calor	Impactos nas obras de construção de rodovias e estruturas de concreto	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008)
	Expansão térmica em juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas, principalmente de concreto de cimento <i>Portland</i>	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); HALL et al. (2019)
	Problemas na integridade do pavimento em virtude de danos tais como deflexões elevadas, fissuras transversais, redução da taxa de deformação do pavimento asfáltico e deformação permanente	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); ZIMMERMAN & FARIS (2010); DAWSON (2014); DAWSON et al. (2016); SONG et al. (2018); NEMANIÛTÉ-GUŽIENĖ & KAŽYS (2019)
	Maior sensibilidade em alguns tipos de ligantes asfálticos, particularmente quando combinado com tráfego de veículos com alta solicitação de carga por eixo	NEMRY e DEMIREL (2012); WORLD BANK (2017)
	Superaquecimento nas faixas, sinalização ou equipamentos eletrônicos	QUINN et al. (2018)

Ameaças Climáticas	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
	Mudanças na paisagem/biodiversidade	EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009)
Incêndios florestais	Contração/Expansão térmica/flambagem de vigas de pontes	NEMANIŪTĖ-GUŽIENĖ & KAŽYS (2019)
	Oxidação do ligante asfáltico	ARGYROUDIS et al. (2019)
	Falha ou fusão de componentes	ARGYROUDIS et al. (2019)
	Degradação de taludes e erosão do solo	ARGYROUDIS et al. (2019)
Elevação temperatura do Ártico e Degelo do permafrost	Deformação plástica (afundamento) de rodovias, fundações de pontes (desabamento), dutos e camadas de pavimento	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); LARSEN et al. (2008); RATTANACHOT et al. (2015); OECD (2018)
	Instabilidade das encostas causada por descongelamento	MCGREGOR; HASSAN; HAYLEY (2008); VAN DER SLUIJS et al. (2018)
	Temporada mais curta para estradas de gelo	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008)
	Comprometimento grave da infraestrutura de estradas de gelo	PROWSE et al. (2009); OECD (2018); HALL et al. (2019)
Congelamento/ Descongelamento	Ocorrência de congelamento diferencial (condições escorregadias se formam na superfície das seções isoladas do pavimento, enquanto as seções convencionais adjacentes do pavimento mantêm as condições da superfície seca)	CÔTÉ e KONRAD (2005)
	Deterioração prematura das estruturas do pavimento, resultando em aumento da rugosidade da superfície e rachaduras no asfalto	HO e GOUGH (2005); RATTANACHOT et al. (2015)
	Instabilidade das encostas rochosas	ARGYROUDIS et al. (2019)
	Mudanças nas propriedades do solo e desgaste de rochas e perda de capacidade de suporte do pavimento	HO e GOUGH (2005)
Queda de neve	Instabilidade das encostas	ARGYROUDIS et al. (2019)
	Avalanches (em zonas montanhosas)	ARGYROUDIS et al. (2019)
	Acúmulo de neve	ARGYROUDIS et al. (2019)
Precipitação Intensa	Aumentos na inundação de rodovias (pavimentadas e não pavimentadas) e túneis subterrâneos	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); DAWSON et al. (2016); NEMANIŪTĖ-GUŽIENĖ & KAŽYS (2019); ARGYROUDIS et al. (2019)
	Diminuição da vida útil do pavimento, devido a danos prematuros de materiais e estrutura	MNDawe et al. (2015); DAWSON (2014); RATTANACHOT et al. (2015); ARGYROUDIS et al. (2019)

Ameaças Climáticas	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
	Sobrecarga dos sistemas de drenagem, causando entupimento da rede e inundações nas vias	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); ZIMMERMAN & FARIS (2010); DAWSON (2014); WORLD BANK (2017); NEMANIŪTĖ-GUŽIENĖ & KAŽYS (2019)
	Deslocamento de massa de solo e rocha mais frequentes (deslizamentos), que geram bloqueios ou mesmo colapso da via	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); NEMRY e DEMIREL (2012); RATTANACHOT et al. (2015); NEMANIŪTĖ-GUŽIENĖ & KAŽYS (2019)
	Impactos nos níveis de umidade do solo, afetando a integridade estrutural de encostas, rodovias, pontes e túneis	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009)
	Impactos adversos da água parada na base da estrada	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008)
	Inundação de sistemas de passagem subterrânea	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); NEMRY e DEMIREL (2012); NEMANIŪTĖ-GUŽIENĖ & KAŽYS (2019)
	Erosão das camadas do pavimento rodoviário e fundações de ponte	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); NEMRY e DEMIREL (2012); DAWSON et al. (2016); WORLD BANK (2017)
	Danos na fundação de pontes e bueiros, devido à abrasão	REGMI e HANAOKA (2011)
Baixa Precipitação (Condições de Seca)	Problemas de instabilidade na infraestrutura, por exemplo, dessecação e encolhimento de materiais de argila	GÜNERALP; GÜNERALP; LIU (2015); ARGYROUDIS et al. (2019)
	Maior suscetibilidade a incêndios florestais que ameaçam diretamente a infraestrutura de transporte e a deslizamentos de solo em áreas devastadas por incêndios florestais	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009)
	Perda de cobertura do solo, favorecendo a erosão pela lixiviação de solos finos, resultando no entupimento dos sistemas de drenagem	DAWSON (2014)
Mudanças na precipitação sazonal e padrões de fluxo do rio	Aumento do risco de inundações causando danos em estradas, pontes e bueiros	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); OEDC (2018); HALL et al. (2019)
	Deslizamentos de solo e rocha e falhas em encostas	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); ARGYROUDIS et al. (2019)
	Danos ao leito em estradas - não pavimentadas	HALL et al. (2019)
	Alteração dos equilíbrios de umidade e influência na deterioração do pavimento (formação de buracos e a perda rápida da condição da superfície)	SHAO; JENKINS; OH (2017)

Ameaças Climáticas	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
	Risco de erosão de pontes: este efeito é atualmente a principal causa de rompimento das fundações da estrutura	NEMRY e DEMIREL (2012); DAWSON et al. (2016)
	Grandes impactos na infraestrutura de travessias de rios, inclusive com submersão de pontes, escoamento de pilares/fundações e impacto no convés devido ao galgamento	REGMI e HANAOKA (2011); DIKANSKI et al. (2016); DAWSON et al. (2016); ARGYROUDIS et al. (2019)
Aumento do nível do mar, adicionado a altas temperaturas: aumento do lençol freático e do risco de inundações	Aumentos na inundação de estradas e rodovias e túneis subterrâneos	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); DAWSON et al. (2016); OEDC (2018); HALL et al. (2019)
	Falhas prematuras no pavimento de estradas e diminuição da vida útil do pavimento, quando as camadas (base, sub-base e subleito) se encontram saturadas	KNOTT et al. (2019).
Aumento do nível do mar, adicionado à tempestade: aumento do risco de inundação da infraestrutura costeira	Inundação de estradas e rodovias em áreas costeiras	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); REGMI e HANAOKA (2011); DAWSON (2014); DAWSON et al. (2016); OEDC (2018)
	Inundações mais frequentes ou graves de túneis subterrâneos e infraestrutura de baixa altitude	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); DAWSON et al. (2016)
	Ondas altas e condições de tempestade podem destruir estradas e rodovias, interrompendo o acesso e exigindo grandes reparos para restaurar as ligações rodoviárias	NEMRY e DEMIREL (2012)
	Erosão das camadas da estrada e fundações de ponte, assim como desgaste da estrutura	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008); EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); NEMRY e DEMIREL (2012); DAWSON (2014); DAWSON et al. (2016)
	Redução do espaço entre a lâmina d'água e o tabuleiro de pontes	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008)
	Perda de barreiras de costa e subsidência da terra (movimento de uma superfície à medida que ela se desloca para baixo relativamente a um nível de referência)	EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009)
	Sobrecarga dos sistemas de drenagem, causando entupimento da rede e inundações nas vias	ZIMMERMAN & FARIS (2010)
	Salinidade mais alta pode levar à desagregação do ligante asfáltico, assim como ataque de às estruturas de fundação de concreto armado	EVANS; TSOLAKIS; NAUDÉ (2009); DAWSON (2014)
Ventos fortes	Impacto na operação das rodovias, podendo em certas velocidades até mesmo causar sérios danos à infraestrutura e tensões de fadiga nas pontes	WORLD BANK (2017)
	Danos permanentes à sinalização de rodovias	DAWSON et al. (2016); WORLD BANK (2017); ARGYROUDIS et al. (2019)
Terremotos	Danos à elementos estruturais (pilares, fundações, etc.)	ARGYROUDIS et al. (2019)
	Danos aos bens geotécnicos (acomodação/deformação, bombeamento de finos, ruptura ao cisalhamento)	ARGYROUDIS et al. (2019)
Tempestades fortes	Inundações de estradas e rodovias e inundações de aterros	REGMI e HANAOKA (2011)

Ameaças Climáticas	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
mais frequentes	Erosão das plataformas rodoviárias ou terrenos adjacentes à estrada, bloqueio do sistema de drenagem, devido ao acúmulo de detritos e redução da cobertura vegetal do solo ao longo da estrada	DAWSON (2014)
	Aumento de danos a sinais, luminárias e suportes e diminuição da expectativa de vida de rodovias expostas à tempestade	NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008)

5. ANÁLISE DE RISCO CLIMÁTICO

Embora existam diversas medidas de adaptação, elas dependem, para uma escolha técnica apropriada, de um profundo conhecimento dos riscos climáticos extremos e dos fatores que os influenciam (REGMI & HANAOKA, 2009). Deve haver ainda um entendimento claro da definição de “risco”, uma vez que a percepção de risco varia entre indivíduos e organizações (QUINN *et al.*, 2018).

Eventos extremos (e.g., precipitação intensa) ou recorrentes (e.g., precipitação prolongada), também chamados de ameaças climáticas, podem acarretar impactos biofísicos tais como o aumento das inundações, alagamentos, erosões, assoreamentos e deslocamentos de massa de solo e rocha, resultando em impactos na infraestrutura rodoviária e comprometendo a integridade dos pavimentos.

Tudo isso pode ocasionar, no pior caso, o colapso do corpo estradal e de obras de arte especiais como pontes e viadutos. Além disso, de acordo com a Figura 3, pode-se notar que as ameaças climáticas (como temperaturas extremas) podem ter impactos diretos na infraestrutura rodoviária, como a expansão térmica em juntas de dilatação de pontes e em superfícies pavimentadas.

Esses impactos são ainda intensificados quando a infraestrutura apresenta sensibilidades (e.g., vegetação degradada de taludes, mau dimensionamento de sistemas de drenagem e tipos de revestimentos inapropriados), bem como a ausência de capacidades adaptativas, tais como o manejo inadequado da vegetação, práticas de reconformação do terreno não aplicadas, falta de instrumentação ou monitoramento, não desobstrução periódica dos sistemas de drenagem, manutenção deficiente, falta de fiscalização dos códigos de materiais e construção e interferência política.



Figura 3. Origem dos impactos na infraestrutura rodoviária. Fonte: elaborada pelos autores.

Tudo que foi dito segue o estabelecido pelo Fifth Assessment Report - AR5 (IPCC, 2014), que indica que o risco de impacto deve ser estabelecido em função de três componentes, a saber: (i) ameaça climática, (ii) exposição e (ii) vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa), conforme indicado na Figura 4.



Figura 4. Modelo conceitual para análise do risco de impacto da mudança climática. Fonte: adaptado de IPCC (2014).

Dessa forma, um passo importante na adaptação frente ao aumento do risco de ameaças climáticas e seus impactos biofísicos decorrentes é a identificação da infraestrutura mais vulnerável - por meio, por exemplo, da criação de um mapa de vulnerabilidade por meio da utilização de dados geo espaciais - e exposta às ameaças climáticas para que os gastos com recursos físicos e econômicos possam ser priorizados (LAMBERT *et al.*, 2013; GIOVANNETTONE *et al.*, 2018).

Em particular, as autoridades rodoviárias e os gestores ambientais precisam de dados úteis e combinações de métodos de análise de risco climático para identificar e avaliar os trechos rodoviários mais críticos (POUSSIN *et al.*, 2013; KALANTARI *et al.*, 2017).

6. ADAPTAÇÃO

Faz-se necessário o desenvolvimento de mecanismos para redução dos impactos da mudança climática por meio de medidas de adaptação, (com opções de engenharia e não-engenharia), que devem ser estabelecidas considerando uma variedade de fatores como sua natureza, localização, características do projeto e práticas de construção, bem como as principais ameaças em diferentes cenários de alterações climáticas relacionados a cada realidade (BHAMIDIPATI, 2014; RATTANACHOT *et al.*, 2015). As ações de adaptação no presente contexto referem-se às várias medidas e iniciativas tomadas, tanto a nível público como de políticas em relação ao setor dos transportes, e implementadas com antecedência como resposta aos efeitos iminentes das alterações climáticas (VAJJARAPU; VERMA; GULZAR, 2019).

No nível estratégico, ou seja, mais amplo, se os fornecedores de componentes de estradas e rodovias e gestores forem avisados de quaisquer efeitos futuros onerosos sobre a infraestrutura existente, eles podem se preparar melhor para lidar com eles (HIRA & CHAI, 2015). No nível tático, aconselha-se a construção e disponibilização de bases de dados para análises sobre a temática. Por fim, no nível operacional, aconselha-se a implementação de tecnologias já disponíveis e identificadas como medidas de adaptação que permitam promover uma maior resiliência à malha de transporte rodoviário por meio de estudos de casos anteriores.

As medidas de adaptação fortalecem a capacidade inerente de um sistema para realizar ações, tanto defensivas, quanto protetoras, que ajudam a evitar perdas e facilitam a recuperação de qualquer impacto, aumentando assim a

resiliência de todo o sistema (VAJJARAPU; VERMA; GULZAR, 2019). Enquanto algumas pesquisas sugerem uma implementação de medidas proativas, como o aumento da espessura do pavimento (KNOTT *et al.*, 2020) e uma atualização dos graus de ligante SUPERPAVE (FLETCHER *et al.*, 2016), outros estudos oferecem recomendações para manutenção precoce - manutenção de rotina, manutenção preventiva ou manutenção corretiva - para manter os pavimentos dentro das mesmas faixas de serviço prestados originalmente (QIAO *et al.*, 2015).

Para maximizar os benefícios do combate à mudança climática, Regmi & Hanaoka (2011) identificaram a necessidade de: (i) aumentar a conscientização/engajamento das partes interessadas sobre os impactos da mudança climática; (ii) revisar os padrões existentes de projeto viário e práticas de construção, considerando os prováveis impactos da mudança climática; (iii) introduzir diretrizes de avaliação do impacto da mudança climática; (iv) estabelecer unidades organizacionais para implementar estratégias de adaptação; e (v) melhorar a coordenação entre as várias partes interessadas para desenvolver uma governança em infraestrutura de transporte resiliente.

Além disso, podem haver co-benefícios e sinergias entre medidas de mitigação e adaptação à mudança climática, maximizando com eficiência seus potenciais, por exemplo, por meio da promoção do transporte público (melhor resiliência a choques energéticos e economias de custos) e vegetação urbana (redução de emissões através do aumento da densidade e proteção do ecossistema, proporcionando benefícios de resiliência), que são as medidas com maior probabilidade de proporcionar benefícios sinérgicos se combinadas com outras medidas de adaptação e/ou mitigação (SHARIFI, 2021).

Destaca-se ainda o envolvimento de profissionais de engenharia certificados no projeto, construção e supervisão de estradas e rodovias e de sistemas de drenagem, que garantem a melhor relação custo-benefício (ADEGOKE & SOJOB, 2015). Além disso, um dos caminhos mais produtivos de pesquisa pode ser a aplicação de tecnologias “inteligentes” à infraestrutura para fornecer respostas flexíveis às mudanças nas condições ambientais (MEYER, 2008).

Salienta-se ainda que muitas comunidades não têm a capacidade de incorporar considerações sobre a mudança climática no planejamento e gestão de infraestrutura, seja por déficits orçamentários ou por falta de capacitação de profissionais. Dessa forma, é

importante que comunidades mais desenvolvidas colaborem ativamente no apoio em planejar, projetar e manter a infraestrutura rodoviária e outras estruturas dessas cidades, bem como capacitar especialistas locais para darem conta dos impactos da mudança climática nessas regiões (PICKETTS *et al.*, 2016).

Há ainda claramente uma necessidade de mais pesquisas sobre os impactos potenciais da mudança climática no projeto de infraestrutura (MEYER, 2008). Geralmente o conhecimento sobre a adaptação do transporte à mudança climática ainda está em um estágio inicial e a literatura existente concentra-se em adaptações excessivamente generalistas ou em medidas técnicas detalhadas. Nesse sentido, mais pesquisas são necessárias sobre a implementação real da adaptação e sobre instrumentos institucionais mais precisos que preencham a lacuna entre adaptações muito vagas e muito específicas ao local (EISENACK *et al.*, 2012).

Uma atenção especial deve ser dada ainda a interconexão das infraestruturas, tanto internamente (diferentes tipos de modos de transporte) quanto entre si (diferentes tipos de setores). Em particular, deve-se observar potenciais eventos em cascata (quando problemas em uma infraestrutura são carregados para outras) e identificar nós-chave que facilitem a governança da adaptação. A magnitude dos impactos depende do grau em que ocorrem efeitos de rede adicionais, da sensibilidade dos processos associados ao uso da rede e da disponibilidade de opções para usar outras redes (BOLLINGER *et al.*, 2014).

7. CONCLUSÃO

É evidente que, sejam quais forem as causas, a extensão e o nível da mudança climática, deve-se planejar e implementar ações em todas as esferas da atividade humana para adaptação a essas mudanças. Nesse sentido, devido ao papel fundamental do sistema de transporte em garantir a estabilidade econômica e o crescimento de uma nação, é importante antecipar os impactos da mudança climática no sistema de transporte e se preparar para isso a tempo.

Portanto, este estudo teve como objetivo realizar identificar ameaças climáticas e impactos na infraestrutura de transporte rodoviário acarretados pela mudança climática, bem como realizar considerações importantes sobre a adaptação a esses impactos. Os resultados mostram que, para cada uma das 12 ameaças climáticas analisadas, podem ser

elencados cerca de 60 potenciais impactos que devem ser analisados caso a caso, inclusive considerando as peculiaridades da região sob análise e as técnicas de construção e manutenção dos ativos da infraestrutura.

Quanto à adaptação, necessária para aumentar a resiliência da infraestrutura rodoviária, destaca-se que deve haver (i) uma análise criteriosa de risco climático, considerando o risco em função da ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa); (ii) um aumento da conscientização e engajamento das partes interessadas em um sistema de transporte rodoviário mais integrado e resiliente à mudança climática, que deve ocorrer no início da avaliação e continuar ao longo do processo; (iii) uma revisão dos padrões existentes de projeto viário e das práticas de construção, inclusive havendo o envolvimento de profissionais de engenharia certificados e (iv) uma ajuda específica às comunidades que não têm a capacidade de incorporar considerações sobre a mudança climática no planejamento e gestão de infraestrutura.

Por fim, acredita-se que mais estudos sobre a temática precisam ser realizados, tanto de revisão documental ou sistemática, quanto de estudos de caso, inclusive aqueles que se aprofundem nos impactos da mudança climática na operação do setor de transportes e nas peculiaridades dos países de clima tropical, como é o caso do Brasil e outros países da América Latina, que ainda carece de pesquisas relacionadas.

REFERÊNCIAS

- ADEGOKE, C. W.; SOJOBI, A. O. Climate change impact on infrastructure in Osogbo metropolis, south-west Nigeria. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences**, v. 6, n. 3, p. 156-165, 2015.
- ARGYROUDIS, Sotirios A. *et al.* Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 191, p. 106567, 2019. DOI:10.1016/j.ress.2019.106567
- ARNDT, Channing *et al.* Climate change, growth and infrastructure investment: the case of Mozambique. **Review of Development Economics**, v. 16, n. 3, p. 463-475, 2012. DOI: 10.1111/j.1467-9361.2012.00674.x
- BHAMIDIPATI, Srirama. Simulation framework for asset management in climate-change adaptation

of transportation infrastructure. *Transportation Research Procedia*, v. 8, p. 17-28, 2015. DOI:10.1016/j.trpro.2015.06.038

BOLLINGER, L. A. *et al.* Climate adaptation of interconnected infrastructures: a framework for supporting governance. *Regional environmental change*, v. 14, n. 3, p. 919-931, 2014. DOI:10.1007/s10113-013-0428-4

CÔTÉ, Jean; KONRAD, Jean-Marie. A numerical approach to evaluate the risk of differential surface icing on pavements with insulated sections. *Cold regions science and technology*, v. 43, n. 3, p. 187-206, 2005. DOI:10.1016/j.coldregions.2005.05.004

DAWSON, Andrew. Anticipating and responding to pavement performance as climate changes. In: *Climate change, energy, sustainability and pavements*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. p. 127-157. DOI:10.1007/978-3-662-44719-2_4

DAWSON, R. J. *et al.* UK climate change risk assessment evidence report: chapter 4, infrastructure. *Report prepared for the Adaptation Sub-Committee of the Committee on Climate Change*, London, 2016.

DIKANSKI, Hristo *et al.* Climate change impacts on railway structures: bridge scour. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*. Thomas Telford Ltd, 2016. p. 237-248. DOI:10.1680/jensu.15.00021

EISENACK, Klaus *et al.* Adaptation to climate change in the transport sector: a review of actions and actors. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 17, n. 5, p. 451-469, 2012. DOI:10.1007/s11027-011-9336-4

EVANS, Caroline; TSOLAKIS, Dimitris; NAUDÉ, Clifford. Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations. In: *ATRF Conference*. 2009. Disponível em: https://www.australasiantransportresearchforum.org.au/sites/default/files/2009_Evans_Tsolakis_Naude.pdf Acesso em: 05 maio 2021.

FLETCHER, Christopher G. *et al.* Projected changes in mid-twenty-first-century extreme maximum pavement temperature in Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 55, n. 4, p. 961-974, 2016. doi:10.1175/JAMC-D-15-0232.1

GIOVANNETTONE, Jason *et al.* A statistical approach to mapping flood susceptibility in the Lower Connecticut River Valley Region. *Water Resources Research*, v. 54, n. 10, p. 7603-7618, 2018. DOI:10.1029/2018WR023018

GÜNERALP, Burak; GÜNERALP, İnci; LIU, Ying. Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Global environmental change*, v. 31, p. 217-225, 2015. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.002

HALL, Jim W. *et al.* *Adaptation of Infrastructure Systems: Background Paper for the Global Commission on Adaptation*. Oxford: Environmental Change Institute, University of Oxford. 2019. Disponível em: https://gca.org/wp-content/uploads/2020/12/GCA-Infrastructure-background-paperV11-refs_0.pdf

HEINZ-PETER, Berg. Risks and consequences of weather hazards on railway infrastructure. In: *Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminar*. 2017. p. 1-11.

HIRA, Mohammad; CHAI, Gary. *Effects of Climate Change on Road Infrastructure and Development of Adaptation Measures*. 2015.

HO, E.; GOUGH, W. A. Freeze thaw cycles in Toronto, Canada in a changing climate. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 83, n. 1, p. 203-210, 2006. DOI:10.1007/s00704-005-0167-7

HUNT, Alistair; WATKISS, Paul. Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic change*, v. 104, n. 1, p. 13-49, 2011. DOI:10.1007/s10584-010-9975-6

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* [Field, C.B. *et al.* (eds.)]. Cambridge & New York, 2014

KALANTARI, Zahra *et al.* Flood probability quantification for road infrastructure: Data-driven spatial-statistical approach and case study applications. *Science of the Total Environment*, v. 581, p. 386-398, 2017. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.12.147

KNOTT, Jayne F. *et al.* A framework for introducing climate-change adaptation in pavement management. *Sustainability*, v. 11, n. 16, p. 4382, 2019. doi:10.3390/su11164382

KNOTT, Jayne F. *et al.* Designing a climate-ready coastal road. In *Proceedings of the TRB 99th Annual Meeting*, Walter E. Washington Convention Center, Washington, DC, 12-16 January 2020. Transportation Research Board (TRB), Washington DC, 2020.

KOETSE, M. J., & RIETVELD, P. The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 3, p. 205-221, 2009. DOI: 10.1016/j.trd.2008.12.004

LARSEN, Peter H. *et al.* Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. **Global Environmental Change**, v. 18, n. 3, p. 442-457, 2008. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2008.03.005

LAMBERT, James H. *et al.* Climate change influence on priority setting for transportation infrastructure assets. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 19, n. 1, p. 36-46, 2013. DOI:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000094

LOCATELLI, Bruno. **Synergies between adaptation and mitigation in a nutshell**. CIFOR, 2011.

MALLICK, Rajib B. *et al.* Understanding the impact of climate change on pavements with CMIP5, system dynamics and simulation. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 19, n. 8, p. 697-705, 2018. DOI:10.1080/10298436.2016.1199880

MALLICK, Rajib B. *et al.* Use of system dynamics to understand long-term impact of climate change on pavement performance and maintenance cost. **Transportation Research Record**, v. 2455, n. 1, p. 1-9, 2014. DOI:10.3141/2455-01

MCGREGOR, Robyn V.; HASSAN, M.; HAYLEY, D. Climate change impacts and adaptation: Case studies of roads in Northern Canada. In: **Proceedings of the 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada**. 2008. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.513.4025&rep=rep1&type=pdf>

MEYER, Michael D. *et al.* **Design standards for US transportation infrastructure: The implications of climate change**. 2008.

MITOULIS, Stergios Aristoteles *et al.* Bridge and transport network resilience-a perspective. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering**. Thomas Telford Ltd, 2021. p. 1-12. DOI:10.1680/jbren.21.00055

MITSAKIS, Evangelos *et al.* Optimal allocation of emergency response services for managing disasters. **Disaster Prevention and Management**, 2014. DOI:10.1108/dpm-10-2013-0182

MNDAWE, M. B. *et al.* Assessment of the effects of climate change on the performance of pavement subgrade. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, v. 7,

n. 2, p. 111-115, 2015. DOI:10.1080/20421338.2015.1023649

NATIONAL RESEARCH COUNCIL *et al.* Potential impacts of climate change on US transportation: Special report 290. **Transportation Research Board**, 2008.

NEMANIŪTĖ-GUŽIENĖ, Jolanta; KAŽYS, Justas. Climate change and Lithuanian roads: impacts, vulnerability and adaptation. In: **Environmental engineering: 10th International conference**, 27-28 April 2017, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. VGTU Press, 2017. p. 1-8. DOI:10.3846/enviro.2017.138

NEMRY, Françoise *et al.* **Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures**. European Commission, Joint Research Centre (JRC), Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), 2012.

NG, Adolf KY *et al.* How is business adapting to climate change impacts appropriately? Insight from the commercial port sector. **Journal of Business Ethics**, v. 150, n. 4, p. 1029-1047, 2018. DOI:10.1007/s10551-016-3179-6

OECD - Economic Co-operation and Development. **Climate-resilient Infrastructure. POLICY PERSPECTIVES**. 2018. Disponível em: <https://www.oecd.org/environment/cc/policy-perspectives-climate-resilient-infrastructure.pdf>

O'CONNOR, Margaret Brownjohn. O10: Implementing the International Climate Change Adaption Framework for Road Infrastructure in Queensland (2018-19/2019-20). **Climate Change Adaption Framework for TMR**. 2020.

PICKETTS, Ian M. *et al.* Climate change adaptation strategies for transportation infrastructure in Prince George, Canada. **Regional Environmental Change**, v. 16, n. 4, p. 1109-1120, 2016. DOI:10.1007/s10113-015-0828-8

POUSSIN, Jennifer K.; BOTZEN, WJ Wouter; AERTS, Jeroen CJH. Stimulating flood damage mitigation through insurance: an assessment of the French CatNat system. **Environmental Hazards**, v. 12, n. 3-4, p. 258-277, 2013. DOI:10.1080/17477891.2013.832650

PROWSE, Terry D. *et al.* Implications of climate change for economic development in northern Canada: Energy, resource, and transportation sectors. **Ambio**, p. 272-281, 2009. DOI: 10.1579/0044-7447-38.5.272

QIAO, Yaning *et al.* Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 41, p. 492-503, 2015. DOI:10.1016/j.trd.2015.09.019

- QUINN, Andrew D. *et al.* Adaptation Becoming Business as Usual: A Framework for Climate-Change-Ready Transport Infrastructure. **Infrastructures**, v. 3, n. 2, p. 10, 2018. DOI:10.3390/infrastructures3020010
- RATTANACHOT, Wit *et al.* Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. **Transport Policy**, v. 41, p. 159-166, 2015. DOI:10.1016/j.tranpol.2015.03.001
- REGMI, Madan B.; HANAOKA, Shinya. Impacts of climate change on transport and adaptation in Asia. In: **Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies Vol. 7** (The 8th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2009). Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2009. p. 206-206.
- REGMI, Madan B.; HANAOKA, Shinya. A survey on impacts of climate change on road transport infrastructure and adaptation strategies in Asia. **Environmental Economics and Policy Studies**, v. 13, n. 1, p. 21-41, 2011. DOI:10.1007/s10018-010-0002-y
- SANTOS, Andrea Souza; RIBEIRO, Suzana Kahn; DE ABREU, Victor Hugo Souza. Addressing Climate Change in Brazil: Is Rio de Janeiro City acting on adaptation strategies? In: **2020 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change** (ICUE). IEEE, 2020. p. 1-11.
- SCHWEIKERT, Amy *et al.* Climate change and infrastructure impacts: Comparing the impact on roads in ten countries through 2100. **Procedia Engineering**, v. 78, p. 306-316, 2014a. DOI:10.1016/j.proeng.2014.07.072
- SCHWEIKERT, Amy *et al.* The infrastructure planning support system: Analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development. **Transport Policy**, v. 35, p. 146-153, 2014b. doi:10.1016/j.tranpol.2014.05.019
- SCHWEIKERT, Amy; ESPINET, Xavier; CHINOWSKY, Paul. The triple bottom line: bringing a sustainability framework to prioritize climate change investments for infrastructure planning. **Sustainability Science**, v. 13, n. 2, p. 377-391, 2018. DOI:10.1007/s11625-017-0431-7
- SHARIFI, Ayyoob. Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. **Science of the total environment**, v. 750, p. 141642, 2021. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.141642
- SHAO, Zeshen; JENKINS, Graham; OH, Erwin. Assessing the Impacts of Climate Change on Road Infrastructure. **International Journal**, v. 13, n. 38, p. 120-128, 2017. DOI:10.21660/2017.38.72099
- SONG, Yongze *et al.* Segment-based spatial analysis for assessing road infrastructure performance using monitoring observations and remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1696, 2018. DOI:10.3390/rs10111696
- SWARNA, Surya Teja; HOSSAIN, Kamal. Climate Change Impact and Adaptation for Highway Asphalt Pavements: A Literature Review. **Canadian Journal of Civil Engineering**, n. ja, 2022. DOI:10.1139/cjce-2021-0209
- TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA - TAC. **Pavement asset design and management guide**. University of Waterloo for the Transportation Association of Canada, Ottawa, 2013.
- VAJJARAPU, Harsha; VERMA, Ashish. Composite adaptability index to evaluate climate change adaptation policies for urban transport. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 58, p. 102205, 2021. DOI:10.1016/j.ijdr.2021.102205
- VAJJARAPU, Harsha; VERMA, Ashish; GULZAR, Saqib. Adaptation policy framework for climate change impacts on transportation sector in developing countries. **Transportation in Developing Economies**, v. 5, n. 1, p. 1-16, 2019. DOI:10.1007/s40890-019-0071-y
- VAN DER SLUIJS, Jurjen *et al.* Permafrost terrain dynamics and infrastructure impacts revealed by UAV photogrammetry and thermal imaging. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1734, 2018. DOI:10.3390/rs10111734
- WANG, Tianni *et al.* Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation and planning. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 88, p. 102553, 2020a. DOI:10.1016/j.trd.2020.102553
- WANG, Tianni *et al.* How can the UK road system be adapted to the impacts posed by climate change? By creating a climate adaptation framework. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 77, p. 403-424, 2019. DOI:10.1016/j.trd.2019.02.007
- 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, 2020b. DOI:10.1016/j.trd.2020.102324
- WORLD BANK. **Climate and Disaster Risk Screening - Sector Screening Guidance note Transportation sector** [s. l.], 2017. Disponível em: <https://climatescreeningtools.worldbank.org/sit>

es/default/files/guidance_note/TRANSPORTATION_Guidance_Note.pdf.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **WMO Provisional Statement on the State of the Global Climate in 2019**, 2019. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10108

ZIMMERMAN, Rae; FARIS, Craig. Infrastructure impacts and adaptation challenges. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1196, n. 1, p. 63-86, 2010.

AUTORES

ORCID: 0000-0002-2557-2721

VICTOR HUGO SOUZA DE ABREU (VHSA), MSc. | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro | Engenharia de Transportes | Correspondência para: Av. Horácio Macedo, 2030, 101 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro, RJ, Brasil | e-mail: victor@pet.coppe.ufrj.br

ORCID: 0000-0003-0983-440X

THAIS GUEDES MÁXIMO MONTEIRO (TGMM) | Universidade Estadual do Rio de Janeiro | Ciência e Tecnologia Ambiental | Rio de Janeiro, RJ - Brasil | Correspondência para: Av. Manuel Caldeira de Alvarenga, 1203 - Campo Grande, Rio de Janeiro - RJ, 23070-200 | e-mail: thaisgmaximo@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2077-6194

FILIPPE BATISTA RIBEIRO, (FBR) MSc. | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro | Engenharia de Transportes | Correspondência para: Av. Horácio Macedo, 2030, 101 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro, RJ, Brasil | e-mail: filiperibeiro@pet.coppe.ufrj.br

ORCID: 0000-0002-5984-6313

ANDREA SOUZA SANTOS (ASS), Dra. | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro | Engenharia de Transportes | Correspondência para: Av. Horácio Macedo, 2030, 101 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro,

RJ, Brasil | e-mail: andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda equipe do Projeto AdaptaVias. Além disso, este trabalho foi financiado pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, sob o número #2021007191.

COMO CITAR ESSE ARTIGO

ABREU, Victor Hugo Souza de; MONTEIRO, Thais Guedes Máximo; RIBEIRO, Filipe Batista; SANTOS, Andrea Souza. Identificação de Ameaças e Impactos da Mudança Climática na Infraestrutura de Transporte Rodoviário. **MIX Sustentável**, v. 8, n. 3, p. 19-34, mai. 2022. ISSN-e: 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. DOI: <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n3.142-156>.

Submitted: 30/08/2021

Approved: 20/05/2022

Published: 01/05/2021

Editor Responsável: Paulo Cesar Machado Ferroli

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

VHSA: conceituação, metodologia, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição, validação, visualização.

TGMM: conceituação, metodologia, escrita - revisão e edição, validação, visualização.

FBR: escrita - revisão e edição, validação.

ASS: administração do projeto, escrita - revisão e edição, validação.

Declaração de conflito: nada foi declarado.