

SERVIÇOS DE CONSULTORIA:

Contratação de serviços de consultoria para o levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transporte terrestres (rodoviário e ferroviário) existente e projetada

PRODUTO 1 - PLANO DE TRABALHO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Parte II. Revisão Bibliográfica

Maio de 2021

Consultoria: Associação GITEC/COPPE

REVISÕES

DATA	AUTOR	VERSÃO
18/05/2021	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	1.0

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quadro conceitual de risco climático.....	7
Figura 2 – Esquema de cadeia de impacto.....	8
Figura 3 – Estrutura de composição hierárquica para a construção dos IRC.....	10
Figura 4 – Método de pesquisa de documentos utilizado no estudo.....	12
Figura 5 – Evolução das publicações sobre a temática do estudo.....	13
Figura 6 – Percentual de publicações por país.....	14
Figura 7 – Palavras-chave para transporte terrestre.	15

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Potenciais impactos de ameaças climáticas no transporte rodoviário.	17
Quadro 2 – Potenciais impactos de ameaças climáticas no transporte ferroviário.	19
Quadro 3 – Comparação dos termos chave entre AR4 e AR5.	22
Quadro 4 – Exemplos de Indicadores de Ameaça encontrados.	22
Quadro 5 – Exemplos de Indicadores de Exposição encontrados.	24
Quadro 6 – Exemplos de indicadores de Sensibilidade encontrados.....	25
Quadro 7 – Exemplos de indicadores de Capacidade Adaptativa encontrados.....	26

LISTA DE SIGLAS

AR4	<i>IPCC Fourth Assessment Report</i> (em português, Quarto Relatório de Avaliação do IPCC)
AR5	<i>IPCC Fifth Assessment Report</i> (em português, Quinto Relatório de Avaliação do IPCC)
ARC	Análise de Risco Climático
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i> (em português, Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 5)
CO2	Dióxido de Carbono
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GEE	Gases de efeito estufa
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (em português, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
IRC	Índice de Risco Climático
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MInfra	Ministério da Infraestrutura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MOVE	<i>Model for Vulnerability Evaluation</i> (em português, Modelo para Avaliação de Vulnerabilidade)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOOA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (em português, Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PIEVC	<i>Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee</i> (em português, Comitê de Vulnerabilidade de Engenharia de Infraestrutura Pública)
ppm	Partes por milhão
PROADAPTA	Projeto Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima
SEP	Setores Estratégicos e Prioritários
TdR	Termo de Referência
USDOT	<i>U.S. Department of Transportation</i>
WCRP	<i>World Climate Research Programme</i> (em português, Programa Mundial de Pesquisa Climática)

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	6
PARTE II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Revisão Conceitual	7
1.2. Abordagem metodológica de Análise de Risco Climático (ARC).....	9
2. DESENVOLVIMENTO DO REPOSITÓRIO DE PESQUISA	11
3. IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS ESTUDOS DE RISCOS E IMPACTOS À INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE TERRESTRE	15
3.1. Transporte terrestre: rodoviário	16
3.2. Transporte terrestre: ferroviário.....	19
4. DETERMINAÇÃO DOS PRINCIPAIS DADOS E INDICADORES DE RISCO CLIMÁTICO NA BIBLIOGRAFIA.....	21
4.1. Indicadores de ameaça	22
4.2. Indicadores de exposição	23
4.3. Indicadores de vulnerabilidade	24
4.3.1. Indicadores de sensibilidade	24
4.3.2. Indicadores de capacidade adaptativa.....	26
5. COMPILAÇÃO DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES DOS ESTUDOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS.....	27
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS: RESPOSTAS PARA AS PERGUNTAS NORTEADORAS DA ETAPA 1	30
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
ANEXOS.....	37

APRESENTAÇÃO

A mudança do clima já é uma realidade e figura como um dos maiores desafios globais do século. A temperatura média global foi 0,87°C mais alta para o período 2006 - 2015 que a média observada no período 1850 - 1900 (IPCC, 2018). Após este período, o ano de 2016 foi considerado o mais quente desde que os primeiros registros de temperatura foram feitos, em 1880 (NASA, 2017). De acordo com três agências internacionais distintas: *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) ou Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço, *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOOA) ou Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos e o Serviço Nacional de Meteorologia do Reino Unido (MET Office). O ano de 2016 foi marcado pelo *El Niño*, fenômeno oceânico natural que contribuiu para um aumento das temperaturas, naquele ano, na ordem de 0,1 a 0,2°C.

O recente ano de 2020 teve suas temperaturas apenas 0,01°C menores do que 2016, e 1,2° C mais altas do que no período pré-industrial (1880–1900). A taxa de CO₂ continuou a crescer, com um aumento de $2,3 \pm 0,4$ ppm (NASA, 2021; Copernicus, 2021), e o ano foi marcado pela presença *da La Niña*, fenômeno natural que ocorre nas águas do Pacífico e, diferentemente do *El Niño*, causa uma redução das médias térmicas.

Além do aumento da temperatura, as mudanças do clima também provocam alterações nas precipitações, com aumento de períodos de fortes chuvas e de estiagem, intensidade dos ventos, entre outros sinais climáticos, os quais podem ocasionar impactos diretos e indiretos sobre diversos setores econômicos. No caso da infraestrutura de transportes terrestres, verificam-se danos decorrentes de inundações em estradas e ferrovias e de deslizamentos, muitos deles causados por eventos climáticos extremos (MMA, 2016).

Diante do atual cenário de condições climáticas desfavoráveis, medidas de adaptação são necessárias para reduzir os riscos e minimizar os impactos, especialmente sobre a infraestrutura de transportes. Existem diversas estratégias de adaptação, com opções de engenharia e não-engenharia, mas que dependem, para uma escolha técnica apropriada, de um profundo conhecimento dos riscos climáticos extremos e dos fatores que os influenciam. Assim, a análise de risco climático é um instrumento essencial para identificar os fatores de risco e as oportunidades atuais e futuras, bem como nortear as medidas de adaptação a serem implementadas.

Assim, o presente relatório (**Produto 1 - Plano de Trabalho e Revisão Bibliográfica**) é composto por duas partes, a saber: **Parte I. Plano de trabalho**, que descreve a lógica empregada para o planejamento do estudo; e **Parte II. Revisão Bibliográfica**, que consiste no levantamento de dados e estudos existentes acerca dos impactos e riscos da mudança do clima na infraestrutura de transportes, e na elaboração do repositório de pesquisa.

Vale ressaltar que essa inventariação não se extingue no presente relatório, pois trata-se de um processo que, para atingir sua finalidade com excelência, deve ser contínuo, uma vez que implica na identificação das fontes, bem como no acesso e no tratamento dos dados que irão subsidiar as etapas subsequentes.

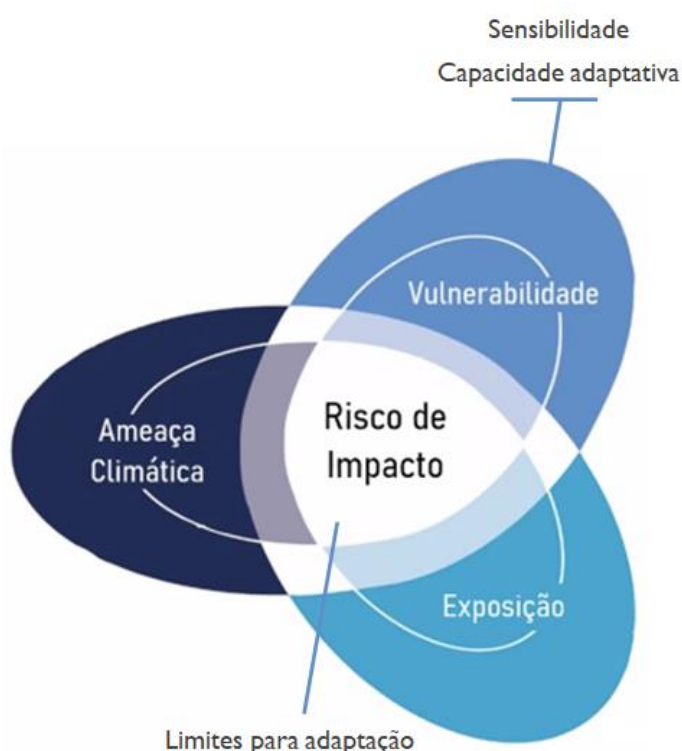
PARTE II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. INTRODUÇÃO

1.1. Revisão Conceitual

O conceito de **risco climático** introduzido no quinto relatório de avaliação (AR5) pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC na sigla inglesa), define: Risco como o potencial para consequências (**impactos**), onde algo de valor está em jogo e onde o resultado é incerto (IPCC, 2014). O risco de impactos relacionados ao clima resulta da interação entre os componentes do risco: **Ameaça climática, Exposição e Vulnerabilidade** (sensibilidade e capacidade adaptativa) de sistemas humanos e naturais (Figura 1).

Figura 1 – Quadro conceitual de risco climático.



Fonte: Adaptado de IPCC, 2018.

As definições dos termos utilizados pela literatura específica (IPCC, 2014) são: **Ameaça** é definida como a **ocorrência potencial de um evento ou impacto físico**, que pode causar algum dano como perda de vida, ferimentos ou outros impactos à saúde, bem como danos e perda de bens materiais, infraestrutura, meios de subsistência, prestação de serviços, ecossistemas e recursos ambientais. Uma ameaça pode ser um **sinal climático** (por exemplo, um evento de precipitação intensa), mas não é necessariamente um evento climático extremo (por exemplo, uma tempestade tropical) e pode ainda ser uma tendência manifestada de forma lenta (por exemplo, redução da disponibilidade de água para abastecimento devido ao rebaixamento do lençol freático das bacias hidrográficas; aumento da temperatura média; aumento do nível do mar; entre outros).

Exposição está relacionada à **presença de elementos** como pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções ambientais, serviços e recursos, infraestrutura ou ativos econômicos, sociais ou culturais **em lugares e ambientes que poderiam ser afetados negativamente**.

Vulnerabilidade é definida como a **propensão ou predisposição a ser adversamente afetada**. A vulnerabilidade abrange os dois elementos de sensibilidade e da capacidade para enfrentar e adaptar:

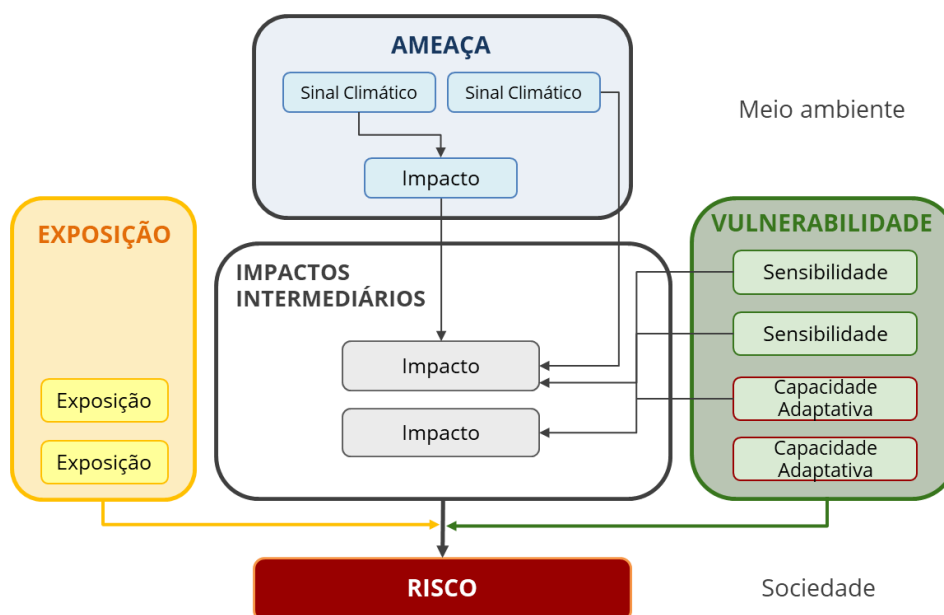
- A **Sensibilidade** é determinada por aqueles **fatores que afetam diretamente as consequências de uma ameaça**. A sensibilidade pode incluir atributos físicos, sociais, econômicos e culturais de um sistema.
- A **Capacidade** no contexto das análises de risco climático refere-se à capacidade **das sociedades e comunidades se prepararem e responderem aos impactos climáticos atuais e futuros**. A capacidade adaptativa é a habilidade de sistemas, pessoas e instituições, usando recursos e oportunidades disponíveis para tratar, gerir e superar as condições adversas, e de se ajustarem a possíveis danos, para aproveitar as oportunidades, ou para responder às consequências.

O termo **impacto** é usado principalmente para se referir aos **efeitos sobre os sistemas naturais e humanos de clima extremo e eventos climáticos e de mudança climática**. Eles geralmente se referem a efeitos sobre vidas, meios de subsistência, saúde, ecossistemas, economias, sociedades, culturas, serviços e infraestrutura, causados pela mudança do clima ou ameaças de eventos climáticos, que ocorrem em um período específico sobre uma sociedade ou sistema exposto com determinada vulnerabilidade.

Os impactos da mudança do clima nos sistemas geofísicos, como enchentes, secas e aumento do nível do mar, são um subconjunto dos impactos chamados de **impactos físicos ou intermediários**. É um termo geral que descreve consequências, que vão desde os impactos físicos diretos de uma ameaça, até as consequências indiretas para a sociedade (os chamados impactos sociais), que confluem ao risco.

A **cadeia de impacto** considera que a ocorrência de um determinado fenômeno climático pode levar a um impacto físico direto, o que causaria uma sequência de impactos intermediários. Estes, devido à vulnerabilidade e à exposição, levariam a uma situação de risco climático. A cadeia de impacto é uma ferramenta analítica útil à compreensão, sistematização e priorização dos fatores de risco e, considera que estas cadeias são compostas pelos componentes do risco (ameaça, exposição e vulnerabilidade) e outros fatores subjacentes para cada um deles.

Figura 2 – Esquema de cadeia de impacto.



Fonte: Adaptado de GIZ e EURAC (2017).

No AR5 (IPCC, 2014) a **adaptação** é definida como o processo de ajuste ao clima atual ou esperado e seus efeitos. Em sistemas socioecológicos, a adaptação visa amenizar ou evitar danos ou explorar oportunidades benéficas. Em geral, medidas de adaptação podem reduzir o risco, reduzindo a vulnerabilidade (diminuindo a sensibilidade e aumentando a capacidade adaptativa) e, em certos casos, também a exposição. No entanto, medidas de redução da exposição são muitas vezes politicamente sensíveis e caras e, por isso, nem sempre uma opção viável.

A identificação das necessidades de adaptação requer que se analise os fatores que determinam a natureza da vulnerabilidade, exposição, probabilidade e intensidade das ameaças climáticas, ou seja, da Análise de Riscos Climáticos.

1.2. Abordagem metodológica de Análise de Risco Climático (ARC)

A Análise de Risco Climático (ARC) objetiva identificar os fatores que contribuem para identificar o risco climático nas rodovias e ferrovias. A ARC é uma ferramenta de apoio às partes interessadas (*stakeholders*) para a tomada de decisões, que implica na avaliação dos componentes do risco climático e da vulnerabilidade, cujo resultado deve fornecer utilidade direta quanto às escolhas de adaptação da infraestrutura de transportes à mudança do clima. A partir desses dados, são reunidos elementos para quantificação e qualificação dos futuros problemas, e então definidas estratégias e medidas de adaptação para fazer face às demandas presentes e futuras relacionadas à mudança do clima.

De acordo com sua definição, o risco ([ver 1.1](#)) é algo cujo resultado é incerto. Em uma análise de risco, essa incerteza pode ser tratada de diferentes maneiras. Em avaliações de risco de desastres, uma abordagem comum é uma avaliação probabilística, onde o risco é representado como a probabilidade de ocorrência de eventos ou tendências perigosas, multiplicada pelos impactos desses eventos ou tendências (IPCC, 2014). Em relação a riscos climáticos, essa abordagem probabilística muitas vezes não é viável. Muitas ameaças e consequências não podem ser descritas como eventos padrão, que é um requisito para uma abordagem probabilística. Ademais, as consequências da mudança do clima não podem ser avaliadas com uma abordagem probabilística, uma vez que as trajetórias futuras socioeconômicas, os cenários das emissões de gases de efeito estufa e, portanto, dos impactos

climáticos são incertos. Portanto, a proposta é compreender o risco climático principalmente como uma função de ameaça, exposição e vulnerabilidade, conforme definido pelo IPCC (2014) e corroborado pela metodologia proposta por GIZ e EURAC (2017). A probabilidade e as incertezas explícitas serão calculadas quantitativamente, sempre que possível, e particularmente na seleção de indicadores de ameaça. No resultado final, a incerteza será avaliada de forma qualitativa e os métodos aplicados dependerão dos acordos estabelecidos com os parceiros.

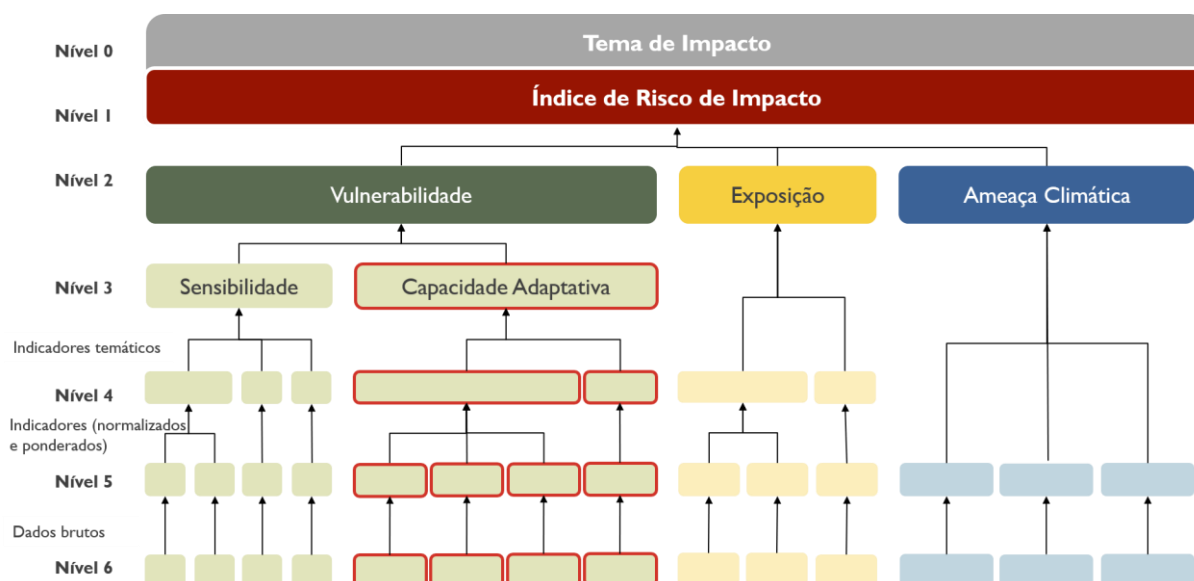
Com isso em vista, diversos institutos e organizações internacionais têm desenvolvido trabalhos sobre a aplicação desses conceitos justamente na temática do presente estudo. Como exemplo, podemos citar dois projetos realizados nos Estados Unidos - *National Research Council* (2008) e *U.S. Department of Transportation – USDOT* (2002) - nos quais uma equipe multidisciplinar de especialistas e pesquisadores se debruçou sobre os efeitos que a mudança do clima tem sobre a infraestrutura de transporte, e delineou diferentes métodos para nortear as análises sobre o clima. Além disso, outra referência trata da entidade canadense *Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee* (PIEVC), cujos trabalhos foram consolidados por Guy (2015) e trazem uma base robusta de diferentes métodos, indicadores e análises.

A metodologia para a ARC do presente estudo se baseará na análise de risco do AR5 (*Model for Vulnerability Evaluation - MOVE*) (IPCC, 2014); no modelo metodológico para análise do risco de impacto da mudança do clima de GIZ e EURAC (2017) e naquele desenvolvido para o AdaptaBrasil do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) além das metodologias utilizadas no desenvolvimento do projeto para avaliação do risco de impacto da mudança do clima em Setores Estratégicos e Prioritários (SEP).

Para a definição de *inputs* necessários para o cálculo é prudente a realização de um processo participativo, conforme as premissas definidas em MMA (2018), com a realização de oficinas com especialistas tanto de risco climático quanto de infraestrutura de transporte terrestre, para que haja alinhamento de entendimento na definição dos parâmetros que serão utilizados para os cálculos do Índice de Risco Climático (IRC), como as relevâncias, da mensuração dos pesos e das importâncias necessárias para a criação dos mesmos.

O cálculo do IRC envolve a agregação dos indicadores individuais normalizados em um indicador composto representando o índice, como ilustrado na Figura 3. O guia recomenda "agregação aritmética ponderada" (GIZ & EURAC, 2017), onde os indicadores individuais são multiplicados por seus pesos, somados e então divididos pela soma de seus pesos, resultando no indicador composto de um componente de risco. Caso não haja diferença de peso, os indicadores são simplesmente somados e divididos pelo número total de indicadores. Todos os indicadores devem estar alinhados da mesma forma em relação ao risco, para isso serão normalizados.

Figura 3 – Estrutura de composição hierárquica para a construção dos IRC.



Fonte: Adaptação da Metodologia do site AdaptaBrasil [s.n].

O procedimento metodológico detalhado, como, p.ex., a forma de agregação e ponderação, será definido ao decorrer da execução do projeto, conforme combinado com o comitê gestor do Estudo AdaptaVias.

Esse quadro conceitual e metodológico fornece a base para o projeto em si e para os capítulos seguintes deste relatório, especificamente, quais palavras-chaves usar na criação do repositório de pesquisa e no levantamento de indicadores usados em experiências estudos internacionais e nacionais.

2. DESENVOLVIMENTO DO REPOSITÓRIO DE PESQUISA

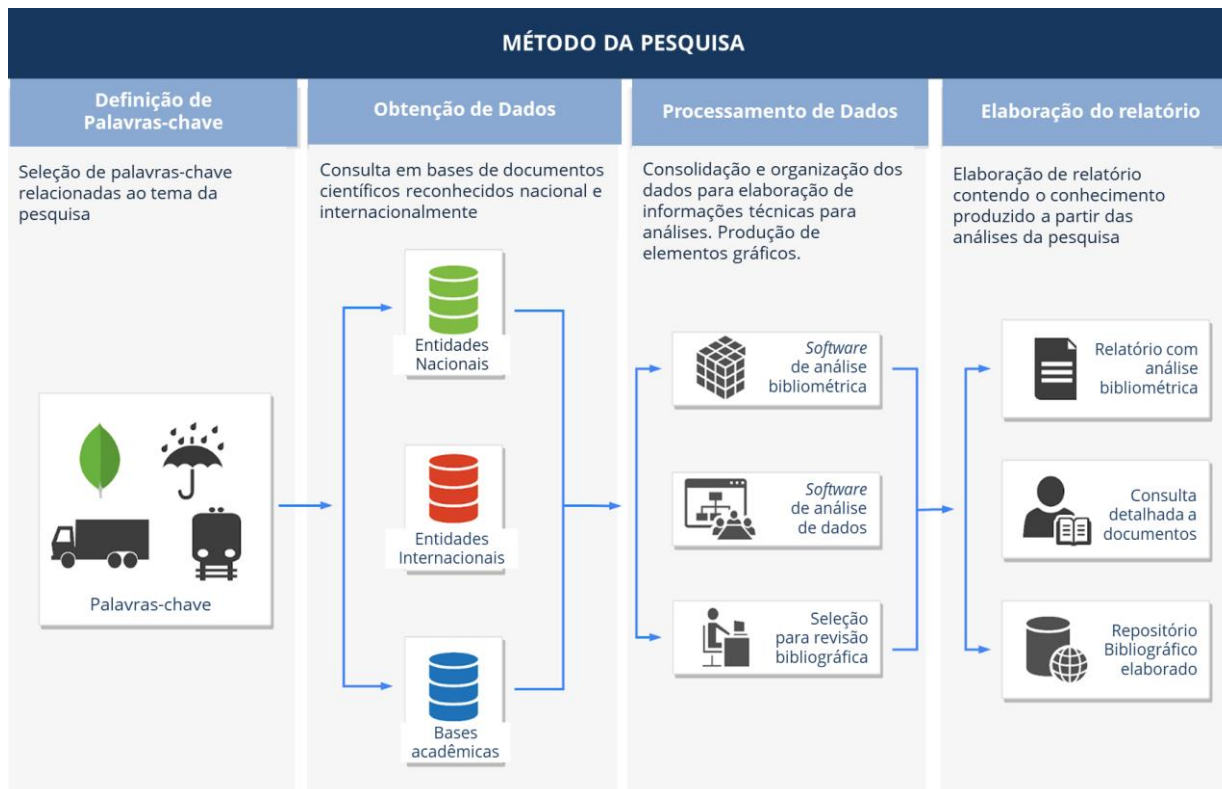
A produção do conhecimento, durante os últimos anos, tem gerado uma magnitude de dados e informações em um nível tão elevado que a atividade de curadoria dos conteúdos mais relevantes tem sido um dos maiores desafios de pesquisadores e estudiosos (BUGBEE et al., 2017). Diante disso, visando obter as informações acerca do estado da arte sobre os riscos e impactos da mudança do clima nas infraestruturas de transporte terrestre, rodoviário e ferroviário, foram consultados os documentos técnicos mais relevantes sobre a temática, dando prioridade aqueles publicados nos últimos 15 anos.

Para obtenção dos principais estudos e criação do repositório de pesquisa, foram realizadas buscas documentais em importantes bases de informação de organismos científicos e iniciativas nacionais, como o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) e o Projeto AdaptaBrasil, e internacionais, como o IPCC, o *National Research Council* e o *World Bank Group*. Cabe destacar que toda revisão bibliográfica se atentou aos estudos sugeridos no Termo de Referência (TdR), Plano de Trabalho, bem como aqueles indicados pelos contratantes durante comunicações prévias em trocas de e-mails e reuniões de alinhamento.

Além disso, para aprimorar ainda mais a fundamentação teórica, procurou-se realizar buscas diretas nas três principais bases de dados internacionais (*Web of Science*, *ScienceDirect* e *Scopus*) por meio de combinações entre palavras-chave diretamente relacionadas à mudança do clima tais como: *'climate change'*, *'risk'*, *'impact'*, *'climatic threat'*, *'exposure'*, *'vulnerability'*, *'sensitivity'* e *'adaptive capacity'* e palavras-chave diretamente relacionadas ao transporte terrestre tais como: *'land transport'*, *'road infrastructure'*, *'highway infrastructure'*, *'pavement'*, *'railway infrastructure'* e *'railroad'*.

infrastructure'. Como diferentes bases de dados podem fornecer estudos iguais, empregou-se o uso do *software* gerenciador bibliográfico, *EndNote*, para organizar os dados e remover conteúdo duplicado. A Figura 4 ilustra o método adotado para essa atividade.

Figura 4 – Método de pesquisa de documentos utilizado no estudo.



Fonte: Elaboração própria (2021).

Vale destacar que antes de incluir diretamente no repositório de pesquisa, os estudos obtidos pelas buscas diretas, realizou-se: (i) uma triagem preliminar, considerando critérios de inclusão (tais como preferência aos estudos mais atuais, enquadramento com o objetivo proposto e prestígio da fonte); e (ii) uma triagem final, considerando critérios de qualificação (tais como os argumentos são expostos claramente e sem viés subjetivo? Há inovação técnica ou contribuição para o estado da arte? Busca averiguar os impactos da mudança do clima na infraestrutura rodoviária e não o inverso?).

Com o repositório de pesquisa concretizado, ou seja, com a inclusão dos estudos obtidos a partir da busca documental (de organismos científicos e iniciativas nacionais e internacionais) e pela busca direta em bases de dados e triagens (artigos científicos publicados em importantes congressos e periódicos científicos), considerou-se interessante ainda realizar análises bibliométricas. A pesquisa bibliométrica busca realizar uma análise exploratória dos dados relacionados à temática em questão, mensurando a contribuição do conhecimento científico derivado das publicações e fornecendo embasamento para execução de políticas públicas e novas pesquisas.

Adiante, utilizando *softwares* específicos para realização das análises bibliométricas, os dados foram organizados e consolidados de acordo com as informações necessárias para a construção dos elementos gráficos (Figuras 5, 6 e 7). Os principais entendimentos obtidos a partir das análises são listados abaixo:

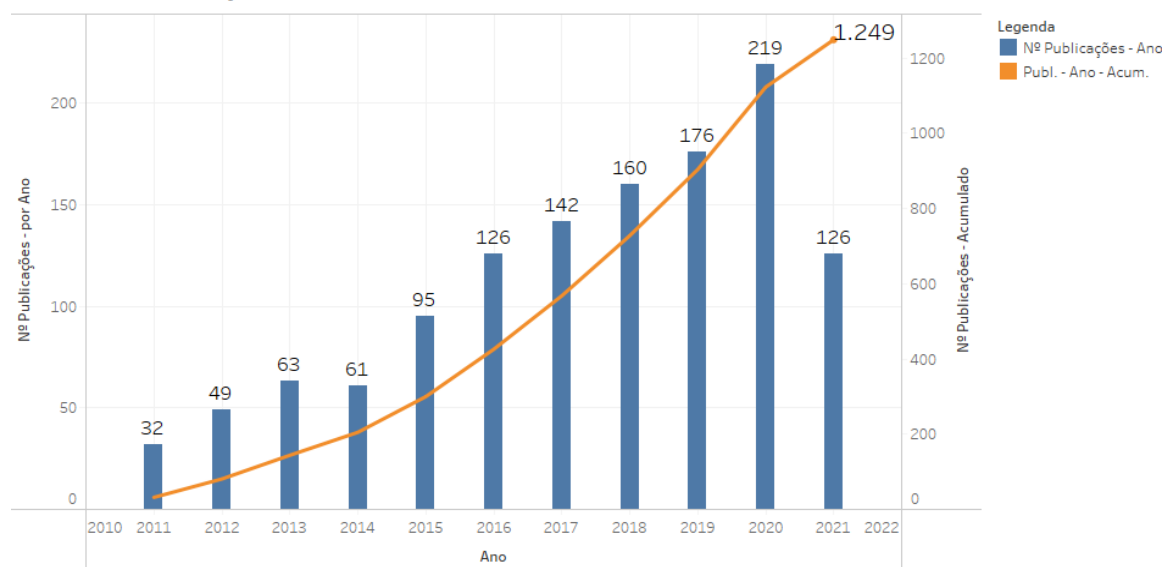
- Utilizando as palavras-chave que se relacionam com a temática, foi possível perceber que os

trabalhos relacionados com o escopo do presente estudo têm apresentado crescimento constante nos últimos dez anos, e com tendência de manutenção desse comportamento ainda em 2021 (figura 5);

- Quanto à localização da realização dos estudos no globo, é possível notar que boa parte dos países tem se debruçado sobre a questão da mudança do clima, seus impactos e a avaliação da capacidade adaptativa da infraestrutura de transporte terrestre. De toda forma, tendo como principais expoentes na produção de conhecimento os EUA (com 18% das publicações) e a China (com 11% das publicações), o Brasil conta apenas com 0,5% dos estudos obtidos durante a pesquisa (figura 6), deixando evidente a necessidade de investimento tanto para a busca no conhecimento das exposições quanto das suas vulnerabilidades (sensibilidade e capacidade adaptativa) nas rodovias e ferrovias. Isto reforça ainda mais a justificativa da realização do presente estudo;
- No intuito de compreender os principais assuntos abordados nos estudos encontrados, assim como identificar novas palavras-chave para expansão da pesquisa, utilizou-se do gráfico de Nuvem de Palavras (figura 7). Essa ferramenta permite discriminar a relevância do termo pelo número de repetições das palavras representado pelo diâmetro dos círculos; pela “clusterização” dos assuntos diante do posicionamento mais central ou periférico; e, finalmente, trata da atualidade da informação com base na escala de cor alinhada ao período de publicação dos estudos. Logo, pode-se afirmar que:
 - a) **mudança do clima** é o tema central nos estudos encontrados, tendo os termos relacionados ao **transporte e infraestrutura** ligados muito proximamente, coerente com os critérios de pesquisa;
 - b) o modo rodoviário se mostra com maior frequência que o modo ferroviário, evidenciando a necessidade de investimento de esforços nessa área;
 - c) as cores do gráfico mostram que as palavras encontradas estão presentes nos estudos dos últimos cinco anos, evidenciando a atualidade do assunto;
 - d) além dos estudos voltados para a **adaptação**, também foram localizados trabalhos que tratam da **mitigação**, sendo realizado o esforço posterior de curadoria para manutenção do foco no escopo definido no TdR.

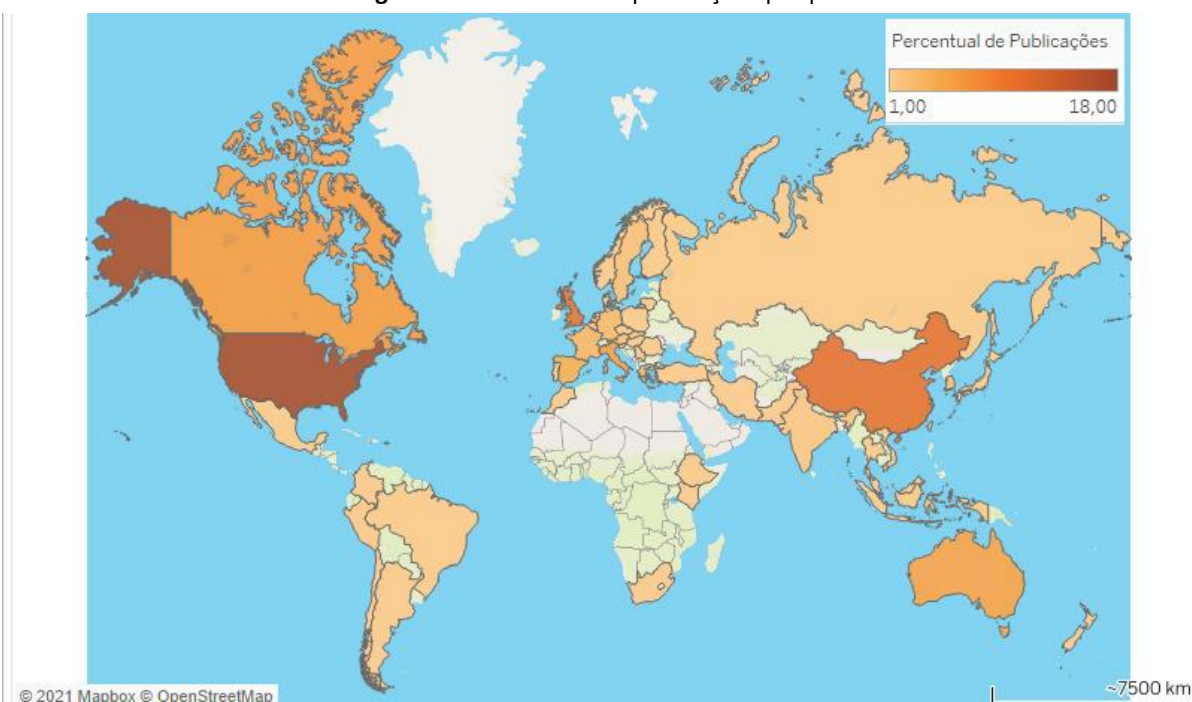
Figura 5 – Evolução das publicações sobre a temática do estudo.

Número de Publicações nos últimos 10 anos



Fonte: Elaboração própria (2021).

Figura 6 – Percentual de publicações por país.



Fonte: Elaboração própria (2021).

condições meteorológicas que são diretamente relevantes para o setor (PBMC, 2013).

O risco climático de uma infraestrutura de transporte depende de uma variedade de fatores, incluindo sua natureza, localização, características de projeto e práticas de construção (RATTANACHOT et al., 2015). Dessa forma, os tomadores de decisão responsáveis por determinar quando e onde a infraestrutura deve ser desenvolvida e/ou aprimorada estão enfrentando um novo desafio com o tópico emergente da mudança do clima (CHINOWSKY & ARNDT, 2012), que representa uma das maiores ameaças que o planeta enfrenta (HEINZ-PETER, 2017).

Atualmente, embora a maior quantidade de estudos foque em medidas de mitigação da mudança do clima no setor de transportes (ou seja, a redução de emissão de Gases de Efeito Estufa) (HUNT & WATKISS, 2011; IPCC, 2014), uma crescente quantidade de estudos tem sido elaborada para avaliar e documentar os impactos da mudança climática na infraestrutura de transporte terrestre (WANG et al., 2020), fornecendo orientações sobre os tipos de impactos potenciais, bem como possíveis estratégias para adaptação a esses impactos (MALLICK et al., 2016). Dependendo do fenômeno climático considerado, sua ocorrência pode levar a um subconjunto de impactos, chamados de impactos físicos ou intermediários, conforme descrito na Seção 1.1, e quando se trata da infraestrutura de transportes, esses ainda podem ser ainda **diretos e indiretos**.

Impactos Diretos e Indiretos

Os impactos diretos são efeitos sobre os sistemas naturais e humanos que são sentidos diretamente, tais como danos à infraestrutura de transportes, ferimentos e mortes (IPCC, 2014).

Os impactos indiretos são efeitos sobre os sistemas naturais e humanos que não são sentidos diretamente, tais como os custos indiretos de atrasos, desvios e cancelamento de viagens, que podem ser substanciais (IPCC, 2014).

Os impactos diretos terão um impacto imediato na infraestrutura física e, portanto, no sistema e rede de transporte existentes (TRB, 2008). Os impactos diretos de condições meteorológicas extremas no transporte são avaliados mais facilmente do que os impactos indiretos, ou possíveis efeitos indiretos entre os sistemas (IPCC, 2014).

Além disso, os impactos na infraestrutura de transporte terrestre geram custos adicionais de manutenção, recuperação ou reconstrução de ativos eventualmente danificados, de maneira que determinados efeitos são percebidos imediatamente, enquanto outros manifestam-se em médio ou longo prazo. Nesse sentido, as próximas subseções buscam identificar os impactos das mudanças do clima na infraestrutura de transporte terrestre, dividida em transporte rodoviário e transporte ferroviário.

Os danos às infraestruturas de transporte causados por cada evento meteorológico extremo podem ser acumulados para estimar as vidas úteis encurtadas em diferentes cenários de alterações climáticas (RATTANACHOT et al., 2015). Destaca-se, entretanto, que a literatura sobre os impactos da mudança climática e adaptação no setor de infraestrutura é principalmente qualitativa, enfatizando recomendações gerais e alertas baseados em estudos gerais do tempo (CHINOWSKY & ARNDT, 2012).

3.1. Transporte terrestre: rodoviário

Estudos anteriores mostraram que, durante eventos climáticos extremos, a integridade e a segurança da infraestrutura rodoviária podem ser comprometidas, levando muitas vezes a acidentes graves (MITSAKIS et al., 2014; DIKANSKI et al., 2016), podendo também impactar em alternâncias e/ou cancelamentos de viagens (KOETSE & RIETVELD, 2009).

Além disso, há provas concretas da redução da vida útil do pavimento relacionada à mudança do clima, destacando a necessidade de considerá-las em projetos regulares de infraestrutura rodoviária que considerem todas as etapas de sua vida útil (MALLICK et al., 2014; DAWSON, 2014; MNDawe et al., 2015). Os potenciais impactos que podem ser ocasionados pelos riscos climáticos à infraestrutura de transporte rodoviário são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Potenciais impactos de ameaças climáticas no transporte rodoviário.

Ameaças / Sinal Climático	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
Temperatura: Altas temperaturas e ondas de calor	Impactos nas obras de construção de rodovias e estruturas de concreto	<i>National Research Council</i> (2008)
	Expansão térmica em juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas, principalmente de concreto de cimento Portland	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009)
	Preocupações com relação à integridade do pavimento em virtude de danos tais como deflexões elevadas, fissuras transversais, redução da taxa de deformação do pavimento asfáltico e deformação permanente	<i>National Research Council</i> (2008); Dawson (2014); Dawson et al. (2016); Song et al. (2018)
	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); <i>World Bank</i> (2017)
	Mudanças na paisagem/biodiversidade	Evans et al. (2009)
Temperatura: Elevação temperatura do Ártico e Degelo do <i>permafrost</i>	Deformação plástica (afundamento) de rodovias, fundações de pontes (desabamento), dutos e camadas de pavimento	<i>National Research Council</i> (2008); Rattanachot et al. (2015)
	Instabilidade de aterro causada por descongelamento	Van der Sluijs et al. (2018)
	Temporada mais curta para estradas de gelo	<i>National Research Council</i> (2008)
	Comprometimento grave da infraestrutura de estradas de gelo	Prowse et al. (2009)
Temperatura: 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	Ho e Gough (2005); Rattanachot et al. (2015)
	Mudanças nas propriedades do solo e desgaste de rochas, e perda de capacidade de suporte do pavimento	Ho e Gough (2005)
Precipitação: Precipitação Intensa	Aumentos na inundação de rodovias (pavimentadas e não pavimentadas) e túneis subterrâneos	<i>National Research Council</i> (2008); Dawson et al. (2016)
	Diminuição da vida útil do pavimento, devido a danos prematuros de materiais e estrutura	Mndawe et al. (2015); Dawson (2014); Rattanachot et al. (2015)
	Sobrecarga dos sistemas de drenagem, causando entupimento da rede e inundações nas vias	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009); Dawson (2014); <i>World Bank</i> (2017)
	Deslocamento de massa de solo e rocha mais frequentes (deslizamentos), que geram bloqueios ou mesmo colapso da via	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009); Nemry e Demirel (2012); Rattanachot et al. (2015); DNIT (2017)
	Impactos nos níveis de umidade do solo, afetando a integridade estrutural de rodovias, pontes e túneis	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009)
	Impactos adversos da água parada na base da estrada	<i>National Research Council</i> (2008)
	Inundação de sistemas de passagem subterrânea	<i>National Research Council</i> (2008); Nemry e Demirel (2012)

Ameaças / Sinal Climático	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
	Erosão das camadas do pavimento rodoviário e fundações de ponte	<i>National Research Council</i> (2008); Nemry e Demirel (2012); Dawson et al. (2016); <i>World Bank</i> (2017)
	Danos na fundação de pontes e bueiros, devido à abrasão	Regmi e Hanaoka (2011)
Precipitação: Baixa Precipitação – Condições de Seca	Problemas de instabilidade na infraestrutura	Güneralp et al. (2015)
	Maior suscetibilidade a incêndios florestais que ameaçam diretamente a infraestrutura de transporte e a deslizamentos de solo em áreas devastadas por incêndios florestais	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009)
	Perda de cobertura do solo, favorecendo a erosão pela lixiviação de solos finos, resultando no entupimento dos sistemas de drenagem	Dawson (2014)
Precipitação: Mudanças na precipitação sazonal e padrões de fluxo do rio	Aumento do risco de inundações de escoamento, deslizamentos de solo e rocha e falhas em encostas e danos significativos às estradas com a elevação da intensidade das chuvas	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009)
	Risco de erosão de pontes de rios: 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 durante enchentes	Regmi e Hanaoka (2011); Dikanski et al. (2016); Dawson et al. (2016)
Aumento do nível do mar, adicionado a altas temperaturas: aumento do lençol freático e do risco de inundações	Aumentos na inundação de estradas e túneis subterrâneos	<i>National Research Council</i> (2008); Dawson et al. (2016)
	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 em áreas costeiras	<i>National Research Council</i> (2008); Regmi e Hanaoka (2011); Dawson (2014); Dawson et al. (2016)
	Inundações mais frequentes ou graves de túneis subterrâneos e infraestrutura de baixa altitude	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009); Dawson et al. (2016)
	Ondas altas e condições de tempestade podem destruir estradas, 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	<i>National Research Council</i> (2008); Evans et al. (2009); Nemry e Demirel (2012); Dawson (2014); Dawson et al. (2016)
	Redução do espaço entre a lâmina d'água e o tabuleiro de pontes	<i>National Research Council</i> (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 et al. (2009)
	Salinidade mais alta pode levar à desagregação do ligante asfáltico, assim como ataque de às estruturas de fundação de concreto armado.	Evans et al. (2009); Dawson (2014)
Ventos: ventos Fortes	Impacto na usabilidade das rodovias, podendo em certas velocidades até mesmo causar sérios danos à infraestrutura e tensões de fadiga nas pontes	<i>World Bank</i> (2017)
	Danos permanentes à sinalização de rodovias	Dawson et al. (2016); <i>World Bank</i> (2017)
	Inundações de estradas e inundações de aterros	Regmi e Hanaoka (2011)

Ameaças / Sinal Climático	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura rodoviária	Referências
Tempestades: tempestades fortes 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	<i>National Research Council</i> (2008)

Apesar de recentes pesquisas demonstrarem um conjunto de possíveis impactos na infraestrutura de transporte rodoviário, muitas são as lacunas de conhecimento na literatura internacional, e principalmente, nacional. Dessa forma, é preciso fomentar pesquisas para conhecer vulnerabilidades, riscos e ameaças frente aos possíveis cenários de aquecimento global. Além disso, recomendamos que códigos de obras levem em conta esses possíveis cenários de mudança do clima e a ocorrência de eventos climáticos cada vez mais frequentes e intensos.

3.2. Transporte terrestre: ferroviário

As condições meteorológicas extremas têm muitos impactos nas operações ferroviárias e na segurança e podem causar danos materiais, ferimentos e mortes (BINTI SA'ADIN et al., 2016). A infraestrutura ferroviária (incluindo trabalhos de terraplenagem, estruturas civis, estrutura de vias, instalações de sinalização e catenária e operações ferroviárias) é, em muitos países, uma das mais afetadas pelos impactos da mudança do clima (HEINZ-PETER, 2017), sendo reconhecida a necessidade de considerar esses impactos nas políticas e projetos de desenvolvimento e adaptação nos sistemas ferroviários (KRAMER et al., 2010; DIKANSKI et al., 2016), principalmente com a ocorrência de eventos mais frequentes e graves (WANG et al., 2020). Nesse sentido, os potenciais impactos que podem ser ocasionados pelos riscos climáticos à infraestrutura de transporte ferroviário são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Potenciais impactos de ameaças climáticas no transporte ferroviário.

Ameaças / Condição Climática Adversa	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura ferroviária	Referências
Temperatura: Altas temperaturas e ondas de calor	Flambagem do trilho (empenamento) - gerando defeitos de geometria e comprometendo o uso da via, mais suscetível no trilho soldado contínuo do que no trilho de junta	<i>National Research Council</i> (2008); Nemry e Demirel (2012); Dawson et al. (2016); Heinz-Peter (2017); <i>World Bank</i> (2017); Wang et al. (2020)
	Alterações na catenária (rede de alimentação elétrica aérea) - devido variação na cota do terreno em torno das fundações dos postes de fixação	<i>World Bank</i> (2017); Heinz-Peter (2017)
	Superaquecimento de equipamentos elétricos	<i>National Research Council</i> (2008)
	Aumento da flacidez do cabo de força no alto (catenária)	Dawson et al. (2016)
Temperatura: Elevação temperatura do Ártico e Degelo do <i>permafrost</i>	Deformação plástica de leitos ferroviários e dutos	<i>National Research Council</i> (2008); Rattanachot et al. (2015)
	Colapso das fundações de pontes	<i>National Research Council</i> (2008)
Temperatura: Congelamento / Descongelamento	Redução da capacidade de suporte das camadas do pavimento ferroviário	Tang et al. (2017)
	Mudanças nas propriedades do solo e desgaste de rochas	Ho e Gough (2005)
	Instabilidade do subleito na ferrovia	Li et al. (2019)

Ameaças / Condição Climática Adversa	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura ferroviária	Referências
Precipitação: Precipitação Intensa	Aumento das inundações de linhas ferroviárias e túneis subterrâneos	<i>National Research Council</i> (2008); Dawson et al. (2016); Wang et al. (2020)
	Inundação de sistemas de passagem subterrânea	<i>National Research Council</i> (2008); Nemry e Demirel (2012); Dawson et al. (2016)
	Transporte de material de aterro (erosão), sobrecarga nos dispositivos de drenagem da via permanente e fundações da ponte danificadas levando ao colapso da ponte e risco de descarrilamento	Wang et al. (2020)
	Danos aos equipamentos elétricos	Palin et al. (2013); Heinz-Peter (2017); Wang et al. (2020)
	Deslocamento de massa de solo e rocha mais frequentes (deslizamentos) e riscos associados que podem causar descarrilamento, por exemplo	<i>National Research Council</i> (2008); Nemry e Demirel (2012); Rattanachot et al. (2015); Binti Sa'adin et al. (2016)
	Danos às estruturas de suporte do leito ferroviário	<i>National Research Council</i> (2008)
	Abrasão da estrutura de pontes	Heinz-Peter (2017)
	Erosão das camadas da via permanente e fundações da ponte	Dikanski et al. (2016); Wang et al. (2020)
Precipitação: Baixa Precipitação – Condições de Seca	Falhas de terraplenagem devido à dessecação e alterações na catenária (rede de alimentação elétrica aérea) - devido variação na cota do terreno em torno das fundações dos postes de fixação	Heinz-Peter (2017)
	Maior suscetibilidade a incêndios florestais que ameaçam diretamente a infraestrutura de transporte e maior suscetibilidade a deslizamentos de solo em áreas devastadas por incêndios florestais	<i>National Research Council</i> (2008)
Precipitação: Mudanças na precipitação sazonal e padrões de fluxo do rio	Aumento do risco de inundações por alagamento e deslizamentos de solo e falhas em encostas	<i>National Research Council</i> (2008)
	Erosão de aterros devido à elevação da lâmina d'água do rio e colapso de dreno longitudinal profundo	Palin et al. (2013)
Aumento do nível do mar, adicionado a altas temperaturas: aumento do lençol freático e do risco de inundações	Risco de inundação e descarrilamento	Wang et al. (2020)
	Redução da capacidade de suporte, em dormentes, principalmente, de madeira	<i>World Bank</i> (2017)
Aumento do nível do mar, adicionado à tempestade: aumento do risco de inundação da infraestrutura costeira	Inundação de ferrovias em áreas costeiras	<i>National Research Council</i> (2008); Wang et al. (2020)
	Inundações mais frequentes ou graves de túneis subterrâneos e infraestrutura de baixa altitude, erosão da base da estrada e fundações de ponte e redução do espaço entre a lâmina d'água e tabuleiro de pontes	<i>National Research Council</i> (2008)
	Erosão costeira de terraplenagens	Heinz-Peter (2017)
	Galgamento (extrapolação da água do mar sobre as barreiras físicas) e dano de defesas marítimas	Palin et al. (2013); Dawson et al. (2016)
	Ondas de tempestade e enchentes podem desguarnecer o lastro, removendo o contato do dormente com o restante das camadas do pavimento, assim como causar lixiviação das estruturas de pontes	<i>World Bank</i> (2017)
Ventos: ventos Fortes	Danos ao equipamento de linha de alimentação de energia aérea (catenária)	Dawson et al. (2016); Heinz-Peter (2017)

Ameaças / Condição Climática Adversa	Exemplos de possíveis impactos à infraestrutura ferroviária	Referências
	Instabilidade de estruturas	Wang et al. (2020)
	Árvores caindo na linha, bloqueando as linhas, causando danos aos trens e derrubando cabeamento	Dawson et al. (2016); <i>World Bank</i> (2017); Wang et al. (2020)
Tempestades: tempestades severas mais frequentes	Maior probabilidade de falhas de infraestrutura e aumento de danos a sinais, luminárias e suportes	<i>National Research Council</i> (2008)
	Desguarnecimento do lastro, removendo o contato do dormente com o restante das camadas do pavimento	<i>World Bank</i> (2017)

Cabe destacar que estudos sobre os impactos da mudança do clima na infraestrutura ferroviária são ainda mais escassos que aqueles relativos à infraestrutura rodoviária, demonstrando assim que esforços significativos ainda precisam ser empregados para o desenvolvimento de mais pesquisas sobre o assunto, principalmente, no Brasil, que embora sofra e continuará sofrendo com os impactos da mudança do clima nas ferrovias, caminha lentamente para investigação desse problema de amplitude mundial e preocupação eminente.

4. DETERMINAÇÃO DOS PRINCIPAIS DADOS E INDICADORES DE RISCO CLIMÁTICO NA BIBLIOGRAFIA

Compreender e quantificar os riscos climáticos é crucial para o planejamento de medidas de adaptação adequadas para salvaguardar e assegurar o funcionamento da sociedade (FORZIERI et al., 2018). Além disso, ao aplicar estratégias de adaptação, o perfil de risco das ameaças diminuirá e deverá atingir o nível de risco aceitável (BLES et al., 2016).

Entretanto, destaca-se que alguns riscos são particularmente relevantes para regiões individuais, enquanto outros são globais. Dessa forma, para a avaliação de risco, é importante avaliar a gama mais ampla possível de impactos, incluindo resultados de baixa probabilidade com grandes consequências (IPCC, 2014).

Nesse sentido, inicialmente, para entender os níveis de risco climáticos, faz-se necessário a identificação de indicadores dos fatores de risco climático para determinar se uma infraestrutura em análise corre ou não risco de ser afetada por certas ameaças climáticas. Nesse sentido, os indicadores de riscos climáticos podem ser divididos em indicadores de ameaça, exposição e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade de adaptação) (AdaptaBrasil [s.n]), que são apresentados e discutidos nas próximas seções.

É importante alertar que os estudos de onde os indicadores foram extraídos podem ter usado definições de risco e vulnerabilidade e seus componentes diferentes do que aquelas apresentadas na [Seção 1.1](#). Esse fato se deve a diferentes quadros conceituais e mudanças deles. Por exemplo, o IPCC mudou o conceito de vulnerabilidade apresentado no Quarto Relatório de Avaliação do IPCC - AR4 (PARRY et al, 2007) para o conceito de risco no AR5 (conforme apresentado no Quadro 3). Entre outras diferenças, os dois conceitos distinguem as causas externas relacionadas ao clima (em AR4 “exposição” e em AR5 “ameaça”) dos atributos do sistema. Além disso, o conceito no AR5 considera explicitamente a presença e a relevância dos elementos expostos como um componente adicional, a exposição. No AR4 esse aspecto é apenas implicitamente incluído na sensibilidade (GIZ & EURAC, 2017).

Quadro 3 – Comparação dos termos chave entre AR4 e AR5.

	Exemplo	AR 4	AR 5
Sinal climático externo	Falta de precipitação	Exposição	Ameaça (sinal climático)
Impacto Físico direto	Seca	Impacto potencial	Ameaça (impacto físico direto)
Atributos internos: Sensibilidade	Tipo de cultivo	Sensibilidade	Vulnerabilidade (sensibilidade)
Atributos internos: Capacidade	Conhecimento em gestão hídrica	Capacidade adaptativa	Vulnerabilidade (capacidade adaptativa)
Presença e relevância de elementos expostos	Relevância de agricultura familiares na região	Implicitamente incluído em sensibilidade	Exposição
Resultado final	Escassez de água para agricultura familiar	Vulnerabilidade	Risco

Fonte: Adaptado de GIZ e EURAC (2017).

Consequentemente, é muito importante analisar rigorosamente em qual componente de risco do AR5 um indicador se encaixa ao levar desse levantamento para as Etapas 3 e 4. A seguir são apresentados os conceitos dos indicadores abordados neste estudo, de forma sucinta, assim como exemplos encontrados ao longo da pesquisa bibliográfica. Para uma consulta completa aos indicadores, detalhamento das características abordadas nos estudos e as referências onde esses indicadores se encontram, é possível acessar o **Anexo II - Tabela de Indicadores**.

4.1. Indicadores de ameaça

As ameaças, acarretadas pela mudança do clima, podem provocar sérios danos na infraestrutura e na segurança de regiões vulneráveis, podendo haver capacidade de transformação significativa do sistema, seja ela lenta ou repentina (AdaptaBrasil [s.n]). Nos estudos consultados, como IPCC (2014) e Nemry e Demirel (2012), os principais indicadores de ameaça climática encontrados são mencionados no Quadro 4.

Quadro 4 – Exemplos de Indicadores de Ameaça encontrados.

Ameaças/ Condição Climática Adversa	Indicadores de Ameaças Climáticas
Precipitação Intensa	Máxima precipitação anual em um dia; precipitação pluviométrica menor que 24 horas (curta duração) - relevante onde a densidade de estações climáticas é alta; precipitação pluviométrica; elevação da precipitação máxima anual; precipitação máxima mensal; precipitação média no inverno; precipitação pluviométrica média no verão; precipitação no dia mais úmido do inverno; precipitação total anual; máxima precipitação por 07 dias; máxima precipitação anual em 05 dias consecutivos; taxa de pico de fluxo fluviométrico em 24 horas para um tempo de retorno de 100 anos (para avaliação de pontes; número anual de dias com precipitação superior à x mm/dia; precipitação máxima em 07 dias para inferência de tendência de riscos futuros; precipitação acima de x mm em 24 horas; evento de precipitação de 24 horas considerando tempo de retorno de 100 anos; precipitação de pico de 100 anos; pico de fluxo fluviométrico de 100 anos; porcentagem de mudança de precipitação no inverno; intensidade e frequência dos eventos de precipitação de chuva em determinado período de tempo; porcentagem de mudança na precipitação no verão; precipitação extrema acima de 50 mm por dia; precipitação extrema acima de 35 mm e precipitação total anual acima de determinado percentil.

Precipitação Prolongada	Número máximo de dias consecutivos com chuva no ano; Intervalo de tempo consecutivo com precipitações acima de determinado valor de precipitação (<i>Sustained rainfall</i>) e intervalo de tempo consecutivo com precipitações acima de determinado valor de precipitação (<i>Longer sustained rainfall</i>).
Ondas de Calor	Temperatura máxima anual em determinado período de tempo; elevação da temperatura máxima anual; número de dias com incêndios florestais; máximos da temperatura do ar; frequência de período de tempo excedendo determinada temperatura em cenário específico de projeção; temperatura do ar no inverno; temperatura do ar no verão; mudança na temperatura diária média anual; mudança na temperatura diária no verão (°C); temperatura média diária máxima no verão; temperatura média no verão; máxima temperatura no verão; temperatura máxima diária; probabilidade de ocorrência de calor extremo e ondas de calor; temperatura máxima do revestimento asfáltico em 07 dias; período de tempo com temperatura acima de limiar crítico para critério técnico em infraestrutura de transporte; dias com temperatura máxima excedendo 35°C e temperatura máxima média em determinado intervalo de tempo.
Seca	Dias consecutivos com precipitação < 0.2mm (<i>low rainfall</i>); dias consecutivos com precipitação < 0.2mm (<i>drought</i>); precipitação total anual; índice de precipitação padronizado e número máximo de dias consecutivos com chuva no ano.
Elevação temperatura do Ártico e Degelo do permafrost	Número de dias com derretimento da neve > x (mm)/ y (h); probabilidade de ocorrência do degelo da camada superior do <i>permafrost</i> diante dos cenários mais pessimistas de emissões e probabilidade de ocorrência de elevação da temperatura do Ártico.
Congelamento/ Descongelamento	Frequência de eventos; número de dias com precipitação de presença de partículas de gelo e magnitude de eventos.
Granizo	Frequência de eventos; número de dias com precipitação de presença de partículas de gelo e magnitude de eventos.
Geadas	Número de dias com queda de neve no ano; dia(s) com temperatura mínima abaixo de -35°C; mudança na média de precipitação no inverno (%); temperatura média diária mínima no inverno; temperatura média do inverno; total da precipitação anual; magnitude dos eventos de geada; frequência e intensidade dos eventos de derretimento rápido; número de dias com queda de neve > 10 cm; dias com rajadas de neve; dias com chuva que precipita como líquido e congela no contato; dias consecutivos com precipitação de chuva com neve; número de dias com temperatura abaixo de -5°C, promovendo congelamento do solo; derretimento de neve > 9mm/3h e número de dias com precipitação de chuva com neve e ventos fortes.
Acúmulo de gelo	Frequência e intensidade de eventos de tempestades de neve; precipitação de chuva em solo congelado > 6mm / 3h; dias consecutivos com uma profundidade de neve > 60 cm e espessura do acúmulo de gelo nos elementos de infraestrutura.
Tempestades	Dias com ventos máximos e período por ano com visibilidade < 1,00m.
Elevação do número de furacões	Probabilidade de aumento na ocorrência de chuvas tropicais, com maior pico de velocidades de vento e precipitações mais intensas.
Elevação do nível do mar	Percentual de infraestrutura de transporte afetada por inundação regular, assumindo cenário de mudança; elevação relativa média do nível do mar; elevação absoluta do nível do mar; elementos de transporte existentes em determinada cota em relação ao nível do mar que serão afetados diante da previsão global da elevação do nível do mar em 1 metro (<i>US Metropolitan East Coast region</i>); projeção de elevação média no nível do mar; probabilidade da continuidade da elevação do nível do mar ao longo do século 21 e aumento do nível do lençol freático.

Fonte: Elaboração própria (2021).

4.2. Indicadores de exposição

Como os impactos da mudança do clima se manifestam localmente, os ativos individuais têm diferentes exposições a perigos, dependendo de sua localização geográfica (FORZIERI et al., 2018). A avaliação da exposição da infraestrutura de transportes aos eventos climáticos extremos é de grande importância para autoridades rodoviárias, instituições governamentais e pesquisadores de segurança em todo o mundo (SCHLÖGL & LAAHA, 2016), que estão cada vez mais diante de decisões desafiadoras sobre como projetar, planejar e gerenciar sua infraestrutura para resistir a choques severos (ROWAN et al., 2013; IPCC, 2014).

Ao determinar a exposição, os analistas muitas vezes sobrepõem a infraestrutura de transporte com representações espaciais de perigos do clima tais como, por exemplo, mapas de aumento do nível do mar descrevendo quais ativos e serviços podem ser inundados em um determinado cenário para aumento do nível do mar. A localização de um ativo em relação aos perigos do clima pode ser uma informação útil na previsão de sua exposição (ROWAN et al., 2014). Nos estudos consultados, como IPCC (2014) e Rowan et. al. (2014), os principais indicadores de exposição encontrados são mencionados no Quadro 5.

Quadro 5 – Exemplos de Indicadores de Exposição encontrados.

Indicador Temático de Exposição	Indicadores Simples de Exposição
Eventos Naturais	Percentual projetado de mudança na quantidade de chuva que cai 24 h em tempestade de 100 anos; frequência de grupo de incêndios; média da precipitação diária anual na qual a degradação da rodovia é assumida como significativamente agravada; severidade de grupo de incêndios; categoria de danos à infraestrutura rodoviária conforme o volume de precipitação; identificação de <i>hotspot</i> climático, tendo como referência a temperatura e precipitação para avaliação da infraestrutura de transporte rodoviário; zona de inundação de 100 anos; zona de inundação de 500 anos; profundidade da inundação causada pela tempestade; índice de vulnerabilidade costeira; precipitação máxima para verificação da capacidade dos dispositivos de drenagem existentes para atender as alterações climáticas previstas; temperatura para verificação da resistência dos pavimentos asfálticos em relação às variações previstas; inundação sob cenários de aumento do nível do mar e maior velocidade do vento modelada na localização do ativo.
Infraestrutura	Porcentagem de ativos que estão nos códigos atuais ou abaixo; porcentagem de ativos que estão em zonas / áreas conhecidas por terem exposição a ameaças; mapear o risco futuro para fissuração do pavimento rodoviário; avaliação da condição geral de ativos críticos em toda a região e porcentagem de ativos críticos com capacidade adicional além da capacidade de demanda normal.
Características do tráfego	Tráfego médio diário anual e composição do tráfego.

Fonte: Elaboração própria (2021).

4.3. Indicadores de vulnerabilidade

A análise da vulnerabilidade das redes e das infraestruturas rodoviárias tem sido um campo de pesquisa crescente na última década e atraiu a atenção de pesquisadores na formulação de métodos que resultaram em uma série de indicadores e índices que medem sua vulnerabilidade a falhas de ligações em redes, que podem causar perda da total ou parcial da capacidade (BALIJEPAI & OPPONG, 2014), bem como a danos potenciais em sua infraestrutura (AUERBACH & HERRMANN, 2016). Uma avaliação de vulnerabilidade bem-sucedida estabelece as bases para a adaptação, construindo relacionamentos com as partes interessadas, estimulando a coleta de dados e priorizando as necessidades (ROWAN et al., 2014).

Identificar os componentes da infraestrutura que são altamente vulneráveis aos impactos das mudanças do clima permite que soluções econômicas, operacionais e políticas sejam desenvolvidas (GUY, 2015). Ao realizar uma avaliação de vulnerabilidade, obtém-se uma visão dos locais das vias ou redes viárias que são suscetíveis a uma determinada ameaça e em que extensão (BLES et al., 2016). Vale ressaltar que os indicadores são compostos pelos indicadores de sensibilidade e capacidade adaptativa, os quais são detalhados a seguir.

4.3.1. Indicadores de sensibilidade

Ativos altamente sensíveis são afetados mesmo por pequenas variações climáticas (por exemplo, alguns graus de mudança de temperatura), e ativos pouco sensíveis podem sofrer impactos climáticos significativos antes de exibir qualquer resposta (ROWAN et al., 2013). Dessa forma, tem-se a necessidade de estipular indicadores de sensibilidade. Nos estudos consultados, como IPCC (2014) e Rowan et. al. (2014), os principais indicadores de sensibilidade encontrados são mencionados na Quadro 6.

Quadro 6 – Exemplos de indicadores de Sensibilidade encontrados.

Indicador Temático de Vulnerabilidade		Indicador Simples de Sensibilidade
Sensibilidade	Operacionalidade / continuidade de acesso	Acessibilidade em redes esparsas; acessibilidade em densas redes viárias urbanas e densidade de sinais rodoviários.
	Infraestrutura: Rodovia e Ferrovia	Tipo de aglutinante de pavimento em relação às temperaturas projetadas; redução da vida útil da estrutura do pavimento; perda de capacidade de carga (pontes, pavimentos, etc.); deslizamentos de rocha e avalanches; inundação das entradas e saídas de ar dos túneis; aumento da pressão hidráulica nas paredes do túnel à medida que os lençóis freáticos sobem; alta temperatura, baixa umidade e vento forte são fatores que reduzem os tempos de pega e a resistência do concreto; limitação nos períodos das atividades de construções (pavimento e estruturas de concreto) devido às saúde e segurança prejudicadas pelas elevadas temperaturas; estabilidade de muros de contenção, cortinas atarantadas e telas de proteção contra deslizamentos de rochas; estabilidade de bermas, taludes, cortes e aterros; percentual de falhas da infraestrutura relacionada com o clima; impacto no paisagismo das vias; fadiga, deflexão, fissuração e deterioração (pontes, pavimentos, etc.); considerações quanto ao projeto de fundação (pontes, pavimentos, etc.); erosão de maciços (aterros, bermas, cortes); mudança no volume de água; prejuízo no estabilidade de maciços; se o pavimento sofreu sulcos (ou mostrou outros sinais de danos) no passado devido às altas temperaturas; se o ativo foi danificado por enchentes no passado por causa de chuva intensa; elevação do ativo em relação às áreas circundantes; quantidade de superfície impermeável ao redor de um ativo; maior suscetibilidade a incêndios florestais; maior suscetibilidade a deslizamentos de terra em áreas desmatadas por incêndios florestais; maior frequência e intensidade nas inundações de rodovias, ferrovias e túneis subterrâneos; descarrilhamento provocado por defeito geométrico (flambagem do trilho); diminuição da VMA - velocidade máxima autorizada da ferrovia; considerações sobre a integridade do pavimento; impacto do tráfego na fissuração do pavimento; maior frequência e intensidade de erosão de estradas e danos às estruturas de suporte do pavimento rodoviário; mudanças nas condições de fixação dos trilhos; temperatura limites de operação da ferrovia para situações de flambagem: <i>streets free temperature</i> (temperatura neutra); probabilidade para eventos com limite de velocidade; total de dias por ano para manutenção da via permanente; estimativa de frequência de incidentes de flambagem; média anual de número de dias que ultrapassam a temperatura máxima no futuro diante da situação atual; mudança no período viável para manutenção no futuro em relação ao cenário presente; correlação considerando os fatores que geram a flambagem nos trilhos; custos com manutenção rodoviária gerados por estressores climáticos; maior frequência e intensidade de deslizamentos de terra e lama; flambagem dos trilhos devido à elevação de temperatura; temperatura ideal para as atividades de manutenção da via permanente (solda e fixações); valores críticos de temperatura máxima para implantação de restrição de velocidade devido ao efeito de flambagem; possibilidade de trincamento devido à SFT em baixas temperaturas; deformação da geometria da via permanente (trilhos); deformação permanente precoce do asfalto; limites superior e inferior da temperatura do ar antes de dano ao revestimento; temperatura máxima do ar na qual é implantada restrições de velocidade na via permanente devido ao risco de flambagem; inundação mais frequentes ou mais severas de túneis e estruturas subterrâneas; inundação de rodovias e ferrovias em áreas costeiras; desguarnecimento do lastro ocasionado por enchentes; aumento da colmatção do lastro (lastro contaminado); revestimento asfáltico escorregadio em torno de 0°C; verões mais longos e invernos mais curtos significa mudanças nos tempos de queda de folhas sobre os trilhos; tempo de retorno de inundação de 100 anos será antecipado; submersão rodoviária e ferroviária e inundação de passagem subterrânea; tipo de dormente, peso do trilho, tipo de fixação, raio da curva, características do lastro e singularidades; avaliação do impacto na infraestrutura conforme o desempenho da funcionalidade; mensuração do impacto conforme nível de severidade; os revestimentos das rodovias são vulneráveis ao clima quente; maior probabilidade de falhas da infraestrutura; idade do ativo; identificação de áreas de risco permanente de inundação e áreas sob risco temporário; estimativa de dano para evento de inundação com tempo de retorno de 100 anos em pavimento rodoviários; para rodovias não pavimentadas, a relação estressor-resposta foi associado com precipitação máxima mensal; análise do dado conforme a tipologia e extensão de superfície; se o ativo é pavimentado; capacidade de resistência dos materiais do ativo a incêndios; perdas das "estradas congeladas"; vida útil restante (RSL).
	Infraestrutura: Pontes	Altura da ponte; expansão térmica das juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas; frequência que a água passa sobre uma ponte; classificação da condição estrutural da ponte; distância entre a superfície da água e o convés (tabuleiro) da ponte; se a ponte é móvel; aumento nos custos de manutenção de pontes; descalçamento de pilares de pontes por erosão; elevação do risco de estabilidade de tabuleiro de pontes; índice para avaliação da sensibilidade da fundação das pontes tendo como parâmetro a caracterização geotécnica do fundo do leito do rio (subleito), o que influencia na velocidade crítica de escoamento da água (laminar ou turbulento), assim como no transporte de sedimentos pela lixiviação do solo; classificação das pontes; parâmetros de avaliação de ponte tendo como referência a mudança no fluxo fluvial gerada pelos impactos climáticos; categorias de vulnerabilidade de pontes tendo como referência a mudança no fluxo fluvial gerada pelos impactos climáticos; critérios para determinar a vulnerabilidade de pontes atualmente deficientes tendo como referência a mudança no fluxo fluvial gerada pelos impactos climáticos; e limiares para reforço de pontes tendo como referência a mudança no fluxo fluvial gerada pelos impactos climáticos.
	Infraestrutura: Sistemas de drenagem	Se a estrutura de drenagem está limpa e sem bloqueios; se há atualização dos critérios de projeto de drenagem atuais; erosão ao longo de corpos hídricos (rios, córregos etc.) e canais de drenagem; transporte de sedimentos e obstrução dos dispositivos de drenagem e sobrecarga dos sistemas de drenagem, causando inundações nas ruas.

Fonte: Elaboração própria (2021).

4.3.2. Indicadores de capacidade adaptativa

Salienta-se ainda que os tomadores de decisão precisam de ferramentas para monitorar e avaliar ações de adaptação para justificar investimentos (KAZMIERCZAK & CARTER, 2010) e isso requer indicadores que mostrem a capacidade adaptativa existente, em que ritmo e em quais locais (IPCC, 2014). Nos estudos consultados, como IPCC (2014) e Rowan et. al. (2014), os principais indicadores de capacidade adaptativa encontrados são mencionados na Quadro 7.

Quadro 7 – Exemplos de indicadores de Capacidade Adaptativa encontrados.

Indicador Temático de Vulnerabilidade		Indicador Simples de Capacidade Adaptativa
Capacidade Adaptativa	Acesso	Capacidade de manutenção de ligações rodoviárias; Importância do ativo para o sistema de transporte; Instituir regulamentação de restrição de cargas nas rodovias; Uso de ativo (por exemplo, tráfego); Capacidade de desvio de tráfego em redes esparsas – mais longos em termos de distância; Capacidade de desvio em densas redes viárias urbanas – mais cursos em termos de distância e Plano de desvio de tráfego.
	Planos e Ações Emergenciais - rotas de evacuação	Avaliação de condição e modelagem de desempenho; Planos de respostas emergenciais sobre vulnerabilidades locais; Análise antecipada da elevação do nível do mar e desenvolvimento de planos locais, utilizando tecnologias GIS; Atuação conjunta entre os responsáveis do setor de transporte juntamente com os órgãos de planejamento para desenvolvimento de planos de evacuação e respostas emergenciais; Monitoramento e uso de tecnologia, para geração de dados que resultem em avisos de potenciais falhas cuja origem esteja relacionada a eventos climáticos extremos e Monitoramento e prioridade federal.
	Planos e Ações Estruturais	Capacidade de investimento do governo local; mudança no tipo de ligante asfáltico utilizado; usar materiais e ligantes (<i>binders</i>) mais tolerantes a altas temperaturas; projetar construções apropriadas, com a sobreposição de tipos e asfalto mais resistentes e robustos; substituir o concreto por asfalto de alta resistência; corrigir os sulcos/afundamentos no pavimento (<i>mill out ruts</i>); realizar inspeções e manutenção com maior frequência; monitorar a condição do solo das estradas existentes; aumentar a limpeza e a manutenção das estradas e seus arredores; realizar plantio de vegetação ao longo das vias para diminuir a exposição das rodovias ao calor; encorajar o transporte de cargas pesadas a viajar no período noturno quando a temperatura ambiente é menor, afetando menos o asfalto; adaptar os padrões de construção para os novos eventos; avaliar os efeitos de transporte de sedimentos na infraestrutura, e desenvolvimento de estratégias de respostas; melhorar o sistema de previsão do tempo a fim de conseguir promover melhores planos de ação e se preparar melhor para potenciais danos; implementar sistemas de avisos e planos de evacuação para eventos extremos de chuvas e inundações; usar materiais de melhor qualidade e resistentes a erosão; melhorar a infraestrutura de drenagem (bueiros); prever túneis de drenagem em baixo de grandes estradas; elevar estruturas; revisar os drenos com frequência; melhorar as fundações; melhorar as condições de monitoramento do subleito especialmente após grandes chuvas e/ou enchentes; emprego de índice de vulnerabilidade para avaliação da infraestrutura; mudança nos limites de velocidade das composições ferroviárias conforme as condições estruturais da via permanente; uso de estruturas de contenção (<i>rip rap</i> entre outros) assim como reforço estrutural nos elementos de infraestrutura de pontes; validação de modelos climáticos, hidrológicos e de impactos com múltiplas escalas; inclusão da temática de mudança climática como fator crítico no desenvolvimento de políticas públicas de longo prazo, no que diz respeito ao setor de infraestrutura de transporte; desenvolvimento de trabalho colaborativo entre agências responsáveis pelo uso do solo, proteção ambiental, gerenciamento de recursos naturais e transporte; reavaliação, desenvolvimento e atualização contínua dos critérios (requisitos) de projeto para a infraestrutura de transporte, com parâmetros endereçados à mudança climática; reavaliação dos tempos de recorrência de precipitação intensa (20, 50 e 100 anos); incorporação da temática de mudança climática nas legislações das esferas federais e estaduais, para que esforços de endereçamento e mitigação sejam tratados de forma multirregionais; Ações para reduzir a flambagem nos trilhos: melhorar as capacidades de previsão do tempo e de comportamento da capacidade do trilho em relação à temperatura (monitoramento com tecnologias emergentes); Realizar a manutenção da via nos momentos iniciais de surgimento das tensões; Aplicar limites de velocidade durante período de alta temperatura; compartilhamento de boas práticas, diante da diversidade geográfica e de ativos; superar a resistência à mudança de paradigmas pelos responsáveis do planejamento de transporte e engenheiros para abranger as adaptações às mudanças climáticas; superar a falta de informações relevantes necessárias para suportar as tomadas de decisões quanto às mudanças climáticas e as medidas necessárias de adaptação; atualizar as zonas de inundação para que levem em conta a elevação do nível do mar, visando rever os recursos destinados à seguros relacionados à desastres; proporção da população atendida com infraestrutura de redução de risco e serviços relevantes para a resiliência; realizar investimento para elevar a robustez e resiliência do ativo; custo para substituir ativo; uso de cenários de "não adaptação" para estimar impacto do custo da 'inação'; pesquisa para identificação de melhores práticas quanto aos efeitos da temperatura no momento da manutenção de troca de trilhos; período de tempo que se espera que o ativo fique fora de serviço; possibilidade em aumentar a capacidade das instalações de drenagem em articulação com outras obras da rede; identificação de ativos históricos; avaliação de alternativas e otimização de programas; planos de curto e longo alcance e monitoramento de desempenho.

Fonte: Elaboração própria (2021).

Finalmente, reforça-se que os indicadores mencionados nesta seção estão relacionados no **Anexo II - Tabela de Indicadores**, no qual estão detalhados com a referência bibliográfica onde foram localizados assim como os limiares adotados nos referidos estudos.

5. COMPILAÇÃO DAS PRINCIPAIS CONCLUSÕES DOS ESTUDOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

A mudança do clima constitui um dos mais graves desafios a serem enfrentados pela sociedade atual até o final do século. A mudança global do clima é caracterizada por um aumento abrupto da temperatura média da Terra, e é manifestada pelo aumento na ocorrência e intensidade de eventos climáticos extremos como: aumento das temperaturas médias e extremas, mais chuvas intensas que levam a inundações e deslizamentos, o aumento de ventos fortes e/ou tempestades, o aumento do nível do mar, entre outros sinais e ameaças climáticas, que podem impactar seriamente a infraestrutura de transportes, operações e mobilidade para rodovias, ferrovias e demais modos.

Estudos desde AR5 confirmam que sérios desafios para todas as infraestruturas de transporte estão aumentando, com consequentes atrasos ou descarrilamento (MIAO et al., 2018; PÉREZ-MORALES et al., 2019). Esses impactos têm sido cada vez mais documentados, mas de acordo com Forzieri et al. (2018) pouco se sabe sobre os riscos de múltiplos extremos climáticos em infraestruturas críticas em escalas locais a continentais. Todas as estradas, pontes, sistemas ferroviários provavelmente sofrerão algum tipo de impacto. É sabido que pavimentos flexíveis são particularmente vulneráveis a temperaturas extremas, que podem causar deformação permanente (QIAO et al., 2019).

As **ameaças climáticas** que mais afetam a infraestrutura de transportes terrestres brasileira são o **aumento da temperatura, da precipitação e da intensidade dos ventos**. As projeções da 5a fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5 – sigla em inglês) do Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP – sigla em inglês) para o clima futuro no Brasil indicam que a temperatura pode aumentar em até 5°C nas regiões Norte e Centro-Oeste, e em até 3°C no Sul do país até 2100, considerando-se cenário de maiores concentrações de gases de efeito estufa (GEE). Já no cenário de estabilização de concentrações de tais gases, esse aumento está limitado em até 3°C no interior do país e em até 2°C mais próximo ao litoral.

De acordo com as projeções regionais de clima, todas as regiões do Brasil terão aumento da temperatura média, variando entre 1 e 6 graus Celsius. Com isso, é muito provável que a infraestrutura de transportes terrestres, o que inclui as rodovias e ferrovias federais brasileiras, sejam impactadas, principalmente pela variação da temperatura e da precipitação. Considerando os cenários de baixas emissões (modelos do IPCC-B2, otimista) e de altas emissões (IPCC-A2, pessimista), dos modelos regionais Eta, RegCM3 e HadRM3 de regionalização (*downscaling*), Modelo HadRM3P e Modelo Eta/CPTec¹, foi possível verificar que, no cenário B2 (otimista), em relação às mudanças projetadas na temperatura, a depender da região, a temperatura poderá variar de 1 a 6 °C de aquecimento. Com relação à anomalia de precipitação, esta terá uma variação por região, podendo vivenciar déficit hídrico e também altas precipitações.

Já no Cenário A2 (pessimista), a temperatura irá aumentar consideravelmente, e, a depender da região, poderá variar de 2 graus, podendo ultrapassar os 6 °C de aquecimento até o final do século. Com relação à anomalia de precipitação, algumas regiões serão impactadas com déficit hídrico e outras apresentam uma tendência de precipitações elevadas.

¹ A saída dos diferentes modelos regionais foi combinada numa única saída usando a técnica de *ensemble*, implementando uma climatologia atual de 1961-90 e as climatologias sazonais para os cenários IPCC-A2 (Altas emissões ou pessimista) e IPCC-B2 (Baixas emissões ou otimista) no período 2071-2100.

O aumento da temperatura, da precipitação e da intensidade dos ventos podem ocasionar impactos diretos e indiretos; as estiagens e secas, inundações, enxurradas e os alagamentos (CEPED-UFSC, 2013; PBMC, 2014; PBMC, 2016) já são os desastres naturais mais frequentes no Brasil, os quais resultam de eventos climáticos extremos, cujas ocorrências e intensidade provavelmente tendem a aumentar, conforme dito anteriormente, trazendo diversos tipos e graus de impactos, e considerando a grande extensão territorial, o país apresenta características distintas com relação à frequência e à magnitude desses desastres conforme cada região geográfica.

Entre os anos de 1991 e 2010, o aumento das precipitações e da ocorrência de desastres naturais provocaram expressivos danos à infraestrutura de transportes. Em 2009, considerado o pior ano tratando-se do aspecto econômico no Brasil, cerca de 1.200 registros de danos à infraestrutura de transportes rodoviária custaram aproximadamente R\$ 3,7 bilhões (BANCO MUNDIAL, 2019).

No Brasil, o risco destas infraestruturas aos impactos dos eventos climáticos elevou-se, quando comparado com outros países, especialmente nações de renda média-alta, devido à insuficiência de ações preventivas no passado. Como exemplo, tem-se as regras de construção e manutenção da infraestrutura, as quais são pouco amadurecidas, resultando em um volume desproporcionalmente alto de danos para uma determinada gravidade de evento (BANCO MUNDIAL, 2019).

Principais conclusões:

- Com base na melhor ciência disponível, foi possível verificar que a mudança do clima, caracterizada pela presença de eventos climáticos extremos, será potencialmente capaz de exercer pressão sobre a infraestrutura de transportes rodoviário e ferroviário ao longo das próximas décadas. Caso a trajetória de emissões de GEE continue ascendente, os impactos serão sem precedentes.
- A mudança do clima **cria vários desafios para o setor de transportes**, que é **altamente vulnerável às condições de tempo e clima** devido à ocorrência de eventos climáticos extremos (KOETSE & RIETVELD, 2009, 2012; IPCC, 2014; PBMC, 2014; RATTANACHOT et al., 2015, BACHNER, 2016).
- Em termos de ameaças relacionadas aos ativos de transportes e à utilização e ao gerenciamento da infraestrutura de transportes terrestres, foi possível identificar na literatura o aumento da variabilidade climática e de eventos climáticos extremos (como mudanças nos padrões de temperatura e precipitação, tempestades com ventos fortes, incêndios florestais, inundações, seca, etc.) (PETERSON et al., 2006; GARDINER et al., 2008; FWHA, 2012; SANTOS, 2014; BRASIL, 2015).
- A **vida útil da infraestrutura construída, bem como projetada, pode ser reduzida** devido ao aumento na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos.
- O risco climático de uma infraestrutura de transporte **depende de uma variedade de fatores**, incluindo sua natureza, localização, características de projeto e práticas de construção (RATTANACHOT et al., 2015) - **A tomada de decisão é fundamental** sobre quando e onde a infraestrutura deve ser desenvolvida e/ou aprimorada.
- Os impactos na infraestrutura de transporte terrestre **geram custos adicionais de manutenção, recuperação ou reconstrução de ativos** eventualmente danificados, de maneira que determinados efeitos são percebidos imediatamente, enquanto outros manifestam-se em médio ou longo prazo. Por isso, é fundamental a adoção de uma visão de longo prazo no planejamento de transportes.
- **A literatura** sobre os impactos da mudança do clima e a adaptação do setor de infraestrutura

de transportes **é principalmente qualitativa**, apresenta recomendações gerais e alertas baseados em estudos gerais do tempo (CHINOWSKY & ARNDT, 2012).

Apresentamos a seguir as principais avaliações sobre os possíveis impactos de ameaças climáticas e risco climático de condições adversas do clima na infraestrutura de transporte terrestre rodoviário e ferroviário.

Rodoviário:

- Eventos climáticos extremos podem **comprometer seriamente a integridade e a segurança da infraestrutura rodoviária**, ocasionando acidentes, com risco de morte e impactos na mobilidade, o que inclui atrasos e cancelamentos de viagens.
- A **redução da vida útil do pavimento** relacionada à mudança do clima e condições do tempo é fortemente evidenciada na literatura, principalmente relacionada a precipitações, inundações e temperaturas elevadas, afetando a confiabilidade e a capacidade adaptativa deste ativo.
- Muitos são os potenciais impactos de ameaças e condições climáticas adversas no transporte rodoviário como:
 - **Altas temperaturas e ondas de calor**, com risco de expansão térmica em juntas de expansão de pontes e superfícies pavimentadas, deformação permanente;
 - **Precipitações intensas**, com aumentos na inundação de rodovias (pavimentadas e não pavimentadas) e túneis subterrâneos, sobrecarga dos sistemas de drenagem, causando *backups* e inundações nas vias, deslocamento de massa de solo e rocha mais frequentes que geram bloqueios ou mesmo colapso da via, erosão das camadas do pavimento rodoviário e fundações de ponte;
 - **Tempestades e ventos fortes**, com impactos na usabilidade das rodovias, podendo em certas velocidades até mesmo causar sérios danos à infraestrutura, além de remover sinalizações em rodovias, aumentando ainda mais o risco de acidentes;
 - **Baixas precipitações ou condições de seca**, com maior suscetibilidade a incêndios florestais com danos permanentes na infraestrutura, risco de deslocamento de solo em áreas degradadas por erosão.

Ferrovário

- As condições meteorológicas extremas impactam nas operações ferroviárias e na segurança, com possíveis danos materiais, ferimentos e mortes (BINTI SA'ADIN et al., 2016). A infraestrutura ferroviária é uma das mais afetadas pelos impactos da mudança do clima em todo o mundo (HEINZ-PETER, 2017).
- Os potenciais impactos das ameaças climáticas e condições climáticas adversas que podem ser ocasionados pelos riscos climáticos à infraestrutura de transporte ferroviário são:
 - **Altas temperaturas e ondas de calor**, com flambagem do trilho (empenamento), gerando defeitos de geometria e comprometendo o uso da via e superaquecimento de equipamentos elétricos;
 - **Precipitação intensa**, aumentos das inundações de linhas ferroviárias e túneis subterrâneos e de sistemas de passagem subterrânea, deslocamento de massa de solo e rocha mais frequentes (deslizamentos), e riscos associados que podem causar descarrilamento, por exemplo;

- **Tempestades e ventos fortes**, com queda de árvores na linha, bloqueando as linhas, causando danos aos trens e derrubando cabeamento e com riscos de afetar a alimentação, além de danos ao equipamento de linha de alimentação de energia;
- **Baixa Precipitação – Condições de Seca**, como maior suscetibilidade a incêndios florestais que ameaçam diretamente a infraestrutura de transporte, alterações na catenária da rede de alimentação elétrica aérea (cabos elétricos), devido ao recalque diferencial do solo (variação na cota do terreno) em torno das fundações e maior suscetibilidade a deslizamentos de solo em áreas atingidas por incêndios florestais.

O grau de impacto dependerá da localização, projeto e administração/gestão das rodovias. Com relação à capacidade adaptativa, vale destacar que quanto menor ela é, maior será a vulnerabilidade da infraestrutura. Foi possível identificar na literatura que as rodovias federais concedidas exibem maior capacidade de resposta às ameaças climáticas atuais e futuras, e existe uma relação regional associada à melhor capacidade de gestão com a taxa de PIB.

Conforme já mencionado, os impactos da mudança do clima na infraestrutura ferroviária são ainda mais escassos que aqueles relativos à infraestrutura rodoviária. Contudo, podemos adotar como premissa que o grau de impacto dependerá da localização, do projeto e da administração/gestão das ferrovias.

A maioria dos países está examinando o que fazer em termos de esforços combinados de mitigação-adaptação (WANG et al., 2020), usando a necessidade de urgência de mitigar as mudanças climáticas por meio de reduções de emissões de GEE e poluentes no transporte, como base para a ação de adaptação.

6. Considerações Finais: respostas para as perguntas norteadoras da Etapa 1

De forma a responder às perguntas apresentadas no Termo de Referência deste estudo, que nortearam a Etapa 1, são apresentadas respostas sucintas elaboradas com base na revisão da literatura a partir de artigos e relatórios técnicos nacionais, como também internacionais. Cabe ressaltar que o Produto 1 como um todo oferece essas respostas de forma mais ampla, mas entende-se que a fim de facilitar a compreensão as perguntas são respondidas nesta seção.

PERGUNTAS NORTEADORAS:

- a) Quais estudos relacionados à análise de impactos e risco climático para os modos de transportes terrestre (rodoviário e ferroviário) existem no Brasil e quais são as principais conclusões?**

Resposta = Os principais estudos encontrados na literatura nacional são relatórios de avaliação do (PBMC, 2014 e 2016) e relatórios técnicos, como por exemplo o Estudo Brasil 2040 (BRASIL, 2015). É consenso que o setor de transportes é altamente vulnerável à mudança do clima. Os riscos estão relacionados à ocorrência de eventos climáticos extremos, com potenciais danos à infraestrutura e ao sistema como um todo.

Na literatura internacional foram identificados estudos sobre os impactos da mudança do clima em componentes dos sistemas, na mobilidade (atrasos e cancelamentos de viagens) e possíveis perdas de vidas. Os estudos sobre a infraestrutura ferroviária são ainda mais escassos que aqueles relativos à infraestrutura rodoviária, demonstrando assim que esforços significativos ainda precisam ser empregados para o desenvolvimento de mais pesquisas sobre o assunto. Os [Quadros 1 e 2 \(Cap. 3\)](#) resumem os principais impactos na infraestrutura de

transportes rodoviário e ferroviário identificados na literatura frente às ameaças ou condição climática adversa (variações na precipitação, temperatura, aumento do nível do mar, ventos fortes, tempestades mais severas). Basicamente os impactos são relatados na infraestrutura, nos componentes dos sistemas, com redução da vida útil e possíveis danos irreversíveis, e na operação.

b) Quais são os principais indicadores de ameaça, exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa usados internacionalmente para realizar uma análise de riscos e impactos climáticos sobre a infraestrutura de transportes terrestres?

Resposta = Muitos foram os indicadores encontrados na revisão da literatura. Apresentamos alguns exemplos com relação aos **indicadores de ameaça, exposição e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa)**:

- **Ameaça -> Precipitação:** Precipitação intensa: “Máxima precipitação anual em um dia”, “Precipitação acima de x mm em 24 horas”; Precipitação prolongada: “Número máximo de dias consecutivos com chuva no ano”; **Onda de calor**: “Temperatura máxima anual em determinado período de tempo”;
- **Exposição -> “avaliação geral dos ativos críticos”** em dada região, relacionado à infraestrutura;
- **Vulnerabilidade (Sensibilidade) -> “perda de capacidade de carga”** (pavimentos, pontes, etc.), ligado ao acesso, densidade de sinais rodoviários;
- **Vulnerabilidade (Capacidade adaptativa) -> “capacidade de manutenção de ligações rodoviárias”**, relacionado à operacionalidade e continuidade de acesso;

A Tabela (**Anexo II. Tabela de Indicadores**) apresenta os principais indicadores de Ameaça, Exposição, Sensibilidade e Capacidade Adaptativa.

Vale ressaltar que, para o desenvolvimento da etapa 3 até a etapa 5, deverão ser escolhidos os indicadores que melhor se aplicam à realidade brasileira visando responder às perguntas norteadoras ao longo do estudo, o que inclui a identificação das ameaças climáticas, análise de vulnerabilidade e exposição, e análise de risco climático.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AdaptaBrasil MCTI [s. n.]. *Metodologia*. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/sobre/metodologia>

AdaptaBrasil MCTI [s. n.]. *Sobre o AdaptaBrasil*. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/sobre>

Auerbach, M., & Herrmann, C. (2016). Adaptation of the Road Infrastructure to Climate Change. In *Materials and Infrastructures 2* (eds Torrenti, J. M., & Torre, F. L.). doi:10.1002/9781119318613.ch14

Bachner, G. (2016). Assessing the economy-wide effects of climate change adaptation options of land transport systems in Austria. *Regional Environmental Change*, 17(3), 929–940. doi:10.1007/s10113-016-1089-x

Balijepalli, N. C., & Oppong, O. (2014). Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas. *Journal of Transport Geography*, 39. 145 - 155. ISSN 0966-6923

- Banco Mundial (2019). *Melhora da Resiliência Climática da Malha Rodoviária Federal Brasileira*. Disponível em: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/424031562946187735/pdf/Improving-Climate-Resilience-of-Federal-Road-Network-in-Brazil.pdf>
- Binti Sa'adin, S. L., Kaewunruen, S., & Jaroszweski, D. (2016). Operational readiness for climate change of Malaysia high-speed rail. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 169(5), 308–320. doi:10.1680/jtran.16.00031
- Bles, T., Bessembinder, J., Chevreuil, M., Danielsson, P., Falemo, S., Venmans, A., ... Löfroth, H. (2016). *Climate Change Risk Assessments and Adaptation for Roads – Results of the ROADAPT Project*. *Transportation Research Procedia*, 14, 58–67. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.041
- Brasil. (2015). Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima. Disponível em: <http://adaptaclima.mma.gov.br/conteudos/63>
- Bugbee, K., Ramachandran, R. & Maskey, M. (2017). The art and science of data curation: Lessons learned from constructing a virtual collection. University of Alabama. *Computers & Geosciences*. Vol. 112. p.76-82. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.11.021>
- CEPED-UFSC (2013). Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. *Volume Amazonas*. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2012/01/AMAZONAS_mioloWEB.pdf
- Chinowsky, P., & Arndt, C. (2012). Climate Change and Roads: A Dynamic Stressor-Response Model. *Review of Development Economics*, 16(3), 448–462. doi:10.1111/j.1467-9361.2012.00673.x
- Copernicus (2021). *Copernicus: 2020 warmest year on record for Europe; globally, 2020 ties with 2016 for warmest year recorded*. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded>
- Côté, J., & Konrad, J.-M. (2005). A numerical approach to evaluate the risk of differential surface icing on pavements with insulated sections. *Cold Regions Science and Technology*, 43(3), 187–206. doi:10.1016/j.coldregions.2005.05.004
- Dawson, A. (2014). Anticipating and Responding to Pavement Performance as Climate Changes. *Green Energy and Technology*, 127–157. doi:10.1007/978-3-662-44719-2_4
- Dawson, R.J., Thompson, D., Johns, D., Gosling, S., Chapman, L., Darch, G., Watson, G., Powrie, W., Bell, S., Paulson, K., Hughes, P. & Wood, R. (2016). UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report: Chapter 4, Infrastructure. Report prepared for the Adaptation Sub-Committee of the Committee on Climate Change.
- Dikanski, H., Hagen-Zanker, A., Imam, B., & Avery, K. (2016). Climate change impacts on railway structures: bridge scour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*. doi:10.1680/jensu.15.00021
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2017). Atlas do Plano de Adaptação de Rodovias Federais (PARF).
- Evans, C., Tsolakis, D., & Naude, C. (2009). Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations.
- FHWA – Federal Highway Administration. (2012). Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework, FHWA-HEP-13-005 (Washington, DC, 2012). Disponível em:

https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/publications/vulnerability_assessment_framework/page01.cfm.

Forzieri, G., Bianchi, A., Silva, F. B. e, Marin Herrera, M. A., Leblois, A., Lavalley, C., ... Feyen, L. (2018). Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, 97–107. doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007

Gardiner, L., Firestone, D., Waibl, G., Mistal, N., Van Reenan, K., Hynes, D., Smart, J., Byfield, J., Oldfield, S., Allan, S., Kouvelis, B., Tait, A., Clark, A. (2008). Climate Change Effects on the Land Transport Network. Volume one: Literature Review and Gap Analysis. *NZ Transport Agency Research Report 378*. Disponível em: <https://nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/378/docs/378-v2.pdf>

GIZ & EURAC (2017). Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook. Guidance on how to apply the Vulnerability Sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept of climate risk. Bonn: GIZ.

GIZ, EURAC & UNU-EHS (2018). Climate Risk Assessment for Ecosystem-based Adaptation – A guidebook for planners and practitioners. GIZ.

Güneralp, B., Güneralp, İ., & Liu, Y. (2015). Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Global Environmental Change*, 31, 217–225. doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.002

Guy, F. (2015). Vulnerability and Adaptation of Transportation Infrastructure to Climate Change. The 2015 Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, PEI.

Heinz-Peter, B. (2017). Risks and consequences of wards on railway infrastructure. *Journal of Polish Safety and Reliability Association*. Summer Safety and Reliability Seminars, 8(1), 1-11.

Ho, E., & Gough, W. A. (2005). Freeze thaw cycles in Toronto, Canada in a changing climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 83(1-4), 203–210. doi:10.1007/s00704-005-0167-7

Hunt, A., & Watkiss, P. (2011). Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic Change*, 104(1), 13–49. doi:10.1007/s10584-010-9975-6

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). 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., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Aquecimento Global de 1,5°C*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>

Kazmierczak, A. & Carter, J. (2010). *Adaptation to Climate Change Using Green and Blue Infrastructure: A Database of Case Studies*. University of Manchester, Manchester, UK, 172 pp.

Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Methods. *Charles Griffin*, London.

Knott, Jayne F.; Jacobs, Jennifer M.; Sias, Jo E.; Kirshen, Paul; Dave, Eshan V. (2019). A Framework for Introducing Climate-Change Adaptation in Pavement Management. *Sustainability*, 11(16), 4382. <https://doi.org/10.3390/su11164382>

Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 205–221. doi:10.1016/j.trd.2008.12.004

- Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2012). Adaptation to Climate Change in the Transport Sector. *Transport Reviews*, 32(3), 267–286. doi:10.1080/01441647.2012.657716
- Kramer, S.A., Prudent-Richard, A. G. & Sainsbury, M. (2010). Incorporating Climate Change Impacts and Adaptation in Environmental Impact Assessments: Opportunities and Challenges. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France, *OECD Environmental Working Paper*, 24
- Mallick, R. B., Jacobs, J. M., Miller, B. J., Daniel, J. S., & Kirshen, P. (2016). Understanding the impact of climate change on pavements with CMIP5, system dynamics and simulation. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8), 697–705. doi:10.1080/10298436.2016.1199880
- Mallick, R. B., Radzicki, M. J., Daniel, J. S., & Jacobs, J. M. (2014). Use of System Dynamics to Understand Long-Term Impact of Climate Change on Pavement Performance and Maintenance Cost. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2455(1), 1–9. doi:10.3141/2455-01
- Miao, Q., Feeney, M. K., Zhang, F., Welch, E. W., & Sriraj, P. S. (2018). Through the storm: Transit agency management in response to climate change. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 421–432. doi:10.1016/j.trd.2018.06.005
- Mitsakis, E., Stamos, I., Maria Salanova Grau, J., & Aifadopoulou, G. (2014). Optimal allocation of emergency response services for managing disasters. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 23(4), 329–342. doi:10.1108/dpm-10-2013-0182
- MMA - Ministério do Meio Ambiente (2016). *Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima*. Volume II: Estratégias Setoriais e Temáticas. Disponível em: <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/PNA-Volume2.pdf>
- MMA - Ministério do Meio Ambiente (2018). *Mata Atlântica - Biodiversidade e Mudanças Climáticas: Método de Análise Participativa de Risco à Mudança do Clima*. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivos/biomas/mata_atlantica/M%C3%A9todo%20de%20An%C3%A1lise%20Participativa%20de%20Risco%20%C3%A0%20Mudan%C3%A7a%20do%20Clima.pdf
- Mndawe, M. B., Ndambuki, J. M., Kupolati, W. K., Badejo, A. A., & Dunbar, R. (2015). Assessment of the effects of climate change on the performance of pavement subgrade. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 7(2), 111–115. doi:10.1080/20421338.2015.1023649
- NASA (2017). *NASA, NOAA Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally*. Disponível em: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally>
- NASA (2021). *NASA, NOAA to Announce 2020 Global Temperatures, Climate Conditions*. Disponível em: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-to-announce-2020-global-temperatures-climate-conditions>
- National Research Council. (2008). Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report 290. Washington, DC: *The National Academies Press*. <https://doi.org/10.17226/12179>.
- Nemry, F. & Demirel, H. (2012). Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructures. Luxembourg: *Publications Office*.
- Palin, E. J., Thornton, H. E., Mathison, C. T., McCarthy, R. E., Clark, R. T., & Dora, J. (2013). Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. *Climatic Change*, 120(1-2), 71–93. doi:10.1007/s10584-013-0810-8

Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.) (2007). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: *Cambridge University Press*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg2/>

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. (2013). Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. PBMC, 28 p.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. (2014). Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. *COPPE: Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 464 pp. ISBN: 978-85-285-0207-7

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. (2016). Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. *COPPE: Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Brasil. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9

Pérez-Morales, A., Gomariz-Castillo, F., Pardo-Zaragoza, P. (2019). Vulnerability of Transport Networks to Multi-Scenario Flooding and Optimum Location of Emergency Management Centers. *Water*, v. 11, n. 1197. <https://doi.org/10.3390/w11061197>

Peterson, T. C. et al. 2006. Climate Variability and Change with Implications for Transportation. Transportation Research Board of the National Academies, TRB Publications Index. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290Many.pdf> . Acesso em: 10/03/2021.

Prowse, T. D., Furgal, C., Chouinard, R., Melling, H., Milburn, D. & Smith, S. L. (2009). Implications of Climate Change for Economic Development in Northern Canada: Energy, Resource, and Transportation Sectors. *J. AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(5),272-8. doi:10.1579/0044-7447-38.5.272

Qiao, Y. et al. (2020). Flexible Pavements and Climate Change: A Comprehensive Review and Implications. *Sustainability*, v. 12, n. 1057. <https://doi.org/10.3390/su12031057>

Rattanachot, W., Wang, Y., Chong, D., & Suwansawas, S. (2015). Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. *Transport Policy*, 41, 159–166. doi:10.1016/j.tranpol.2015.03.001

Regmi, M. B., & Hanaoka, S. (2011). A survey on impacts of climate change on road transport infrastructure and adaptation strategies in Asia. *Environmental Economics and Policy Studies*, 13(1), 21–41.

Rowan, E., Evans, C., Riley-Gilbert, M., Hyman, R., Kafalenos, R., Beucler, B., ... Schultz, P. (2013). Assessing the Sensitivity of Transportation Assets to Extreme Weather Events and Climate Change. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2326(1), 16–23. doi:10.3141/2326-03

Rowan, E., Snow, C., Choate, A., Rodehorst, B., Asam, S., Hyman, R., ... Gye, A. (2014). Indicator Approach for Assessing Climate Change Vulnerability in Transportation Infrastructure. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2459(1), 18–28. doi:10.3141/2459-03

Santos, A.S. (2014). Vulnerabilidades, Impactos e Adaptação no Setor de Transportes (capítulo 5.3.3). Contribuição ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Volume 2. *Rio de Janeiro: PBMC*, Rio de Janeiro, Brasil, v.2. p.234-244.

Schlögl, M., & Laaha, G. (2016). Extreme weather exposure identification for road networks – a comparative assessment of statistical methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi:10.5194/nhess-2016-373

Song, Y., Wright, G., Wu, P., Thatcher, D., McHugh, T., Li, Q., ... Wang, X. (2018). Segment-Based Spatial Analysis for Assessing Road Infrastructure Performance Using Monitoring Observations and Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 10(11), 1696. doi:10.3390/rs10111696

TRB – Transportation Research Board. (2008). *Potential impacts of climate change on U.S. transportation*, special report no. 290, TRB, Washington, DC.

USDOT - U.S. Department of Transportation Center for Climate Change and Environmental Forecasting (2002). The Potential Impacts of Climate Change on Transportation Research Workshop. *Federal Research Partnership Workshop*.

Van der Sluijs, J., Kokelj, S., Fraser, R., Tunnicliffe, J., & Lacelle, D. (2018). Permafrost Terrain Dynamics and Infrastructure Impacts Revealed by UAV Photogrammetry and Thermal Imaging. *Remote Sensing*, 10(11), 1734. doi:10.3390/rs10111734

Wang, T. et al (2020). Impact analysis of climate change on rail systems for adaptation planning: A UK case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 83, n. 102324. ISSN 1361-9209. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102324>.

World Bank (2017). *Climate and Disaster Risk Screening - Sector Screening Guidance note Transportation sector*. Disponível em: https://climatescreeningtools.worldbank.org/sites/default/files/guidance_note/TRANSPORTATION_Guidance_Note.pdf

ANEXOS:

Anexo I - Repositório Bibliográfico (apresentado em documento separado)

Anexo II - Tabelas de Indicadores (apresentado em documento separado)